www.e-rara.ch

Elémens de physique expérimentale et de météorologie

Pouillet, Claude Servais Mathias

Paris, 1832

ETH-Bibliothek Zürich

Shelf Mark: Rar 24601

Persistent Link: https://doi.org/10.3931/e-rara-62828

www.e-rara.ch
Die Plattform e-rara.ch macht die in Schweizer Bibliotheken vorhandenen Drucke online verfügbar. Das Spektrum reicht von Büchern über Karten bis zu illustrierten Materialien – von den Anfängen des Buchdrucks bis ins 20. Jahrhundert.

e-rara.ch provides online access to rare books available in Swiss libraries. The holdings extend from books and maps to illustrated material – from the beginnings of printing to the 20th century.

e-rara.ch met en ligne des reproductions numériques d'imprimés conservés dans les bibliothèques de Suisse. L'éventail va des livres aux documents iconographiques en passant par les cartes – des débuts de l'imprimerie jusqu'au 20e siècle.

e-rara.ch mette a disposizione in rete le edizioni antiche conservate nelle biblioteche svizzere. La collezione comprende libri, carte geografiche e materiale illustrato che risalgono agli inizi della tipografia fino ad arrivare al XX secolo.

Nutzungsbedingungen Dieses Digitalisat kann kostenfrei heruntergeladen werden. Die Lizenzierungsart und die Nutzungsbedingungen sind individuell zu jedem Dokument in den Titelinformationen angegeben. Für weitere Informationen siehe auch [Link]

Terms of Use This digital copy can be downloaded free of charge. The type of licensing and the terms of use are indicated in the title information for each document individually. For further information please refer to the terms of use on [Link]

Conditions d'utilisation Ce document numérique peut être téléchargé gratuitement. Son statut juridique et ses conditions d'utilisation sont précisés dans sa notice détaillée. Pour de plus amples informations, voir [Link]

Condizioni di utilizzo Questo documento può essere scaricato gratuitamente. Il tipo di licenza e le condizioni di utilizzo sono indicate nella notizia bibliografica del singolo documento. Per ulteriori informazioni vedi anche [Link]

Visual Library

№ 114.
Rar 24601 : 1/1
78136 : 1/1
X

M. Isenschmid Stud. Med.
Mars 35.

Louis Rollier
Professeur
1886.

BIBLIOTHEK D. EIDG. TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

ÉLÉMENS
DE PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE
ET
DE MÉTÉOROLOGIE.

TOME I.

PREMIÈRE PARTIE.

SE TROUVE AUSSI CHEZ LES LIBRAIRES CI-APRÈS :

A BRUXELLES, chez M. TIRCHER ;

A GAND, chez M. DUJARDIN ;

A LIÉGE, chez M. DESOER ;

A MONS, chez M. LEROUX.

PARIS. — IMPRIMERIE DE COSSON,
RUE SAINT-GERMAIN-DES-PRÉS, N° 9.

ÉLÉMENS
DE
PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE
ET DE
MÉTÉOROLOGIE,

PAR M. POUILLET,

Professeur de Physique à la Faculté des Sciences et à l'École Polytechnique; Membre de la Société philomatique, du Conseil de la Société d'Encouragement, etc.

Ouvrage adopté par le Conseil royal de l'instruction publique pour l'enseignement dans les établissemens de l'Université.

SECONDE ÉDITION, revue, corrigée et augmentée.

Verus experientiæ ordo primo lumen accendit, deinde per lumen iter demonstrat.

Bacon, *Nov. Org.*



TOME PREMIER.

PREMIÈRE PARTIE.

A PARIS,
CHEZ BÉCHET JEUNE,
LIBRAIRE DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE,
PLACE DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE, N° 4.

1832.

ETH-BIBLIOTHEK ZÜRICH
78 136:1/1

AVERTISSEMENT

SUR LA PREMIÈRE ÉDITION.

Les leçons que nous donnons à la Faculté des Sciences, M. Gay-Lussac et moi, s'adressent à un grand concours d'auditeurs. Il n'y a jamais eu en France et il n'y a nulle part en Europe une chaire publique qui, par son institution, puisse servir d'une manière plus efficace à répandre dans la jeunesse les connaissances de la philosophie naturelle. L'Université prend un soin particulier d'étendre notre cabinet de physique et d'augmenter nos collections d'instrumens. C'est par ces moyens que nous pouvons, dans le cours d'une année, embrasser toutes les branches de la science et faire toutes les expériences fondamentales qui se rapportent à chacune d'elles. Les plus longs développemens ne suppléeraient pas à la seule inspection des appareils et des phénomènes qu'ils peuvent produire; c'est surtout en physique qu'il faut voir et toucher : quand les yeux sont frappés par l'expérience, le raisonnement

a plus de prise pour frapper l'intelligence. Cependant, nos paroles sont comptées par le temps, nos déductions doivent être courtes et rapides; et c'est, pour ainsi dire, d'un seul trait que nous devons faire passer l'esprit, de la contemplation des faits les plus simples à la conception des idées les plus générales. Celui qui écoute saisit au premier instant; il aperçoit, suivant le degré d'attention qu'il y porte, tantôt une faible lueur, tantôt une vive lumière; mais bientôt les traces de la vérité se perdent ou se confondent. C'est à peu près comme un vaste paysage dont on voit l'arrangement et l'ensemble; si l'on passe rapidement ou si la vue se tourne vers un autre point de l'horizon, il est à craindre qu'une seconde image ne trouble ou n'efface la première. Un simple dessin, une rapide esquisse suffit à l'esprit attentif pour réveiller ses souvenirs et rétablir l'ordre dont il avait été frappé.

Ces Élémens de Physique et de Météorologie sont à peu près le texte de mes leçons, et cependant ils n'en peuvent être qu'une esquisse. A plus forte raison ne peuvent-ils être qu'une imparfaite ébauche des leçons de M. Gay-Lussac, malgré tous les efforts que j'ai dû faire pour me rapprocher le plus possible de son plan et de sa méthode. Une foule de détails, de descriptions et de rapprochemens doivent être supprimés dans un livre, à moins de redoubler les longueurs et les embarras de style au milieu des-

quels la vérité a déjà tant de peine à percer. Les difficultés qui se présentent, pour composer un ouvrage élémentaire de physique, sont sans nombre; on en a trop de preuves, et sans doute elles m'auraient retenu si le zèle des auditeurs de la Faculté et l'empressement avec lequel ils accueillent mes leçons ne m'eussent fait un devoir de tenter un nouvel effort pour leur être utile : puisque ma vie est consacrée à la science et à l'enseignement, il faut bien accomplir ma tâche avec tout le soin et tout le dévouement dont je suis capable.

AVERTISSEMENT

SUR LA DEUXIÈME ÉDITION.

Il y a à peine huit mois que le dernier volume de la première édition est publié, et déjà le besoin d'une nouvelle édition se fait sentir. Cet accueil plein de bienveillance avec lequel on a reçu mon ouvrage m'imposait l'obligation de redoubler de soins et d'efforts pour offrir au public une deuxième édition qui représentât d'une manière simple et fidèle l'état actuel de la science.

Le plan général n'a éprouvé aucun changement : les nouvelles découvertes sont venues se classer d'elles-mêmes dans les divisions principales que j'avais adoptées pour la première édition. La méthode logique et expérimentale à laquelle je m'étais particulièrement attaché pour exposer dans leur ensemble tous les phénomènes et toutes les lois générales de la physique, a été accueillie avec trop d'indulgence pour qu'il me fût permis de la modifier. S'il est vrai que cette méthode, débarrassée des considérations et des formules mathématiques, rende la science accessible à tous les esprits, il est certain qu'elle fera

naître des observateurs et par conséquent des découvertes; car c'est par les recherches expérimentales que l'on découvre des faits nouveaux et non pas par les spéculations mathématiques.

Cette deuxième édition ne diffère donc de la première que par des corrections assez nombreuses et par d'importantes additions. J'indiquerai ici, comme ayant un haut degré d'intérêt et d'utilité, les savantes recherches de MM. Arago et Dulong sur la loi de Mariotte et sur la force élastique de la vapeur d'eau. Ces recherches, entreprises sur l'invitation de l'Académie des sciences, s'étendent jusqu'à des températures qui dépassent tous les besoins actuels de l'industrie, et il est probable que le génie de la mécanique dans ses plus hardies conceptions ne pourra jamais atteindre ces limites pour des machines usuelles.

Plusieurs savans météorologistes m'ayant témoigné le désir qu'ils auraient de trouver dans les Élémens de Météorologie qui terminent le quatrième volume le résultat des principales observations relatives au magnétisme terrestre, je me suis fait un devoir de consacrer un chapitre à ce vaste sujet. On y trouvera la belle carte de l'équateur magnétique construite par le capitaine Duperrey d'après ses observations, celles de M. De Blosseville et celles du capitaine Sabine. Je regrette vivement de n'avoir pas pu resserrer dans d'assez étroites limites la discussion des intensités magnétiques et celle de toutes les

inclinaisons connues jusqu'à ce jour, pour indiquer la trace actuelle des lignes sans inclinaison et le lieu probable des pôles magnétiques ; mais j'ai du moins essayé de rapporter, avec quelques détails, tout ce que l'on sait maintenant de plus précis sur le phénomène des aurores boréales.

15, quai Voltaire, 14 juillet 1831.

ÉLÉMENS
DE PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE
ET
DE MÉTÉOROLOGIE.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

CHAPITRE PREMIER.

Des Phénomènes naturels. — De l'Espace. — Du Temps. — De la Matière. — Des Forces. — Du Mouvement. — De l'inertie.

1. Les phénomènes naturels qui se produisent sur la terre, et ceux qui paraissent dans le ciel, nous offrent de vastes sujets de méditation : on les regarde, on les contemple, et l'on cherche à démêler dans leurs apparences variées des propriétés communes ou des vérités générales. Le désir de pénétrer dans un sujet si merveilleux nous emporte malgré nous; soyons libres un moment des soins et des distractions de la vie, et c'est sur le tableau des phénomènes de la nature que viennent se reposer nos regards : tantôt ils se por-

tent sur l'ensemble et parcourent curieusement la vaste étendue de l'horizon, tantôt ils s'arrêtent sur un point, et suivent le cours d'un phénomène ou les périodes d'un mouvement. Nous sommes nés observateurs, et sous ce rapport tous les hommes sont physiciens. Mais en réfléchissant sur tant de choses diverses, nous prenons l'habitude de généraliser les résultats de nos réflexions; nous sortons des limites de ce que voient nos yeux et de ce qui se démontre de soi-même; nous voulons rapprocher les effets observés pour remonter jusqu'aux causes qui les produisent, et c'est alors que commence l'incertitude de nos jugemens; c'est alors que les bons esprits font voir toute leur puissance, et les autres toute leur faiblesse. Qu'y a-t-il de plus curieux pour l'histoire de l'intelligence, que de suivre, à travers le développement des siècles, les idées singulières que les hommes se sont faites successivement sur les propriétés des corps, sur les élémens qui les composent, sur les principes et sur les causes qui agitent la matière, et qui maintiennent l'harmonie du monde? Quelle confusion d'hypothèses et d'erreurs, au milieu desquelles les hommes de génie ont jeté çà et là quelques vérités fécondes! Et même de notre temps, qu'y a-t-il de plus curieux que d'interroger les divers esprits, depuis les plus vulgaires jusqu'aux plus habiles, et d'entendre leurs idées sur les phénomènes de la nature, sur les effets de l'air et de l'atmosphère, sur l'équilibre des eaux tout autour de la terre, sur les effets sans nombre de la chaleur et de la lumière, sur la météorologie, sur la cause du tonnerre, par exemple, que l'on n'ose plus personnifier, il est vrai, mais que plusieurs se représentent encore comme ayant une forme et un corps! Quelle variété d'images et de conceptions! quelle différence entre les hommes! quelle différence entre les peuples! On peut dire que dans une seule génération se retrouvent les pensées de tous les siècles; dans un esprit inculte chez un peuple ignorant, toutes les erreurs avec tous les préjugés; dans un esprit cultivé, chez

un peuple éclairé, toutes les connaissances qui se sont transmises d'âge en âge, et toutes les lois générales auxquelles la raison ait pu s'élever.

La physique, qu'on appelle aussi la philosophie naturelle, n'est qu'une partie de ces connaissances, qui forment maintenant le domaine de l'intelligence; elle en est la partie philosophique et fondamentale. On a coutume de dire qu'elle a pour objet les propriétés des corps, et les actions qu'ils exercent à de grandes distances; c'est en effet ce qu'on en peut dire de plus simple, quand on veut absolument en dire quelque chose. Mais tenter de définir une science, c'est consentir à être inintelligible pour ceux qui ne savent pas au moins les premiers élémens de cette science; ainsi on nous permettra sans doute de commencer l'étude de la physique, plutôt par les notions générales sur lesquelles elle repose que par des définitions qui seraient nécessairement incomplètes.

2. *De l'Espace.* — Nous concevons très-facilement les longueurs et les distances; une longueur de six pieds est une chose qui nous est familière, et nous concevons avec la même facilité la distance qui nous sépare d'un point éloigné de l'horizon, ou encore celle qui se trouve entre nous et une étoile; et c'est la plus grande distance à laquelle la matière agit sur nous. Nous comprenons tous de la même manière les étendues en superficie, comme la surface d'un grand lac ou la surface de la mer, et les étendues en volume, comme un pied cube de marbre ou de pierre, le volume d'une maison ou celui d'une montagne. Concevons donc un pied cube de marbre qui soit suspendu au milieu d'une masse d'eau; nous savons qu'il peut être déplacé, et qu'à l'instant l'eau vient remplir la place qu'il occupait: mais imaginons que l'eau n'y vienne pas, qu'elle soit arrêtée de quelque manière; ou plutôt concevons que le cube de marbre puisse être anéanti, qu'il ne reste de lui que ses six faces, et qu'elles soient capables de retenir l'eau exactement

des six côtés différens. Ce volume où il n'y aurait plus de marbre, et où il n'y aurait point d'eau, ni aucune autre chose, c'est de l'*espace*, c'est l'espace qu'occupait le pied cube de marbre et que nous pouvons concevoir privé de toute matière. Quelques métahysiciens l'appellent l'*espace pur*, et les physiciens l'appellent l'*espace vide*. Nous en avons limité l'étendue pour en avoir une idée plus juste; mais ce que nous disons d'un pied cube pourrait se dire d'un volume beaucoup plus grand. Nous pouvons concevoir qu'une montagne s'anéantisse, depuis son sommet jusqu'à sa base, et notre esprit conserverait encore l'idée du volume ou de l'espace qu'elle occupait. Il en serait de même de tout le globe de la terre : et il ne faut pas plus d'effort pour concevoir le volume qu'il occupe, que pour concevoir le volume occupé par une bille de billard ou par un boulet de canon.

Au dessus de nos têtes est l'atmosphère, et au dessus de l'atmosphère est le vide du ciel. Notre esprit peut s'élever aussi dans ces régions : il peut se fatiguer à les parcourir dans tous les sens; il rencontre, au milieu de ces espaces, des corps comme la terre, des astres sur lesquels il se repose; mais quelle distance les sépare, quel abîme est au delà ? Cette voûte du ciel n'est qu'une apparence; elle n'a rien de solide, et, fût-elle solide comme du diamant, notre esprit ne s'y arrête pas; il en pénètre la profondeur; il poursuit l'espace au delà de cette voûte et au delà des étoiles; il conçoit que toute limite est impossible; il embrasse l'immensité, et conçoit quelque chose de plus grand. Ainsi l'espace est indéfini pour nos conceptions, et, par conséquent, infini dans la réalité.

Une portion finie de l'espace est dans notre langage ce que nous appelons l'*étendue*; mais il arrive souvent que l'on dit, l'espace d'un pied cube, au lieu de dire l'étendue d'un pied cube. Il n'en résulte aucune confusion pour les discussions physiques.

3. *Du temps.* — On dit communément que l'homme, à l'aspect des phénomènes naturels, prend l'idée de succession et celle de *temps*. Ainsi, dit-on, le printemps succède à l'hiver, et le jour à la nuit; voilà l'idée de succession : l'eau qui coule succède à l'eau qui s'est écoulée, le flux de la mer succède au reflux; voilà l'image du temps. Mais il n'est besoin ni de phénomènes extérieurs, ni d'aucune affection des sens pour que nous ayons présentement l'idée du temps : nous pensons, et nous avons la conscience de nos pensées; nous pensons successivement, et nous avons l'idée de succession et de continuité. Sans doute, ce phénomène intérieur ne nous permet de compter ni les heures, ni les jours, ni les années; mais avoir l'idée du temps et avoir le moyen de le mesurer sont deux choses différentes. Tous les mouvemens extérieurs pourraient être suspendus, les astres pourraient cesser de tourner, les nuages pourraient être immobiles, l'eau cesser de couler; et cependant, au milieu de ce repos universel, nous saurions encore que le temps se peut subdiviser, bien que nous n'eussions plus aucune mesure de ces subdivisions.

L'idée du temps et celle de l'espace se retrouvent dans toutes nos perceptions et dans toutes nos idées; le néant est incompréhensible pour nous, ou plutôt, quand nous essayons de le comprendre, nous ne comprenons autre chose que l'espace et le temps.

4. *De la Matière et des divers états des corps.* — L'idée d'espace est une idée complète qui se suffit à elle-même, c'est-à-dire que nous pouvons concevoir l'espace et rien dans cet espace; mais elle n'est point une idée exclusive avec laquelle rien ne se puisse associer. Dans l'espace, nous pouvons concevoir *l'impénétrabilité*, et l'impénétrabilité c'est *la matière*. On n'a pas raison de dire que la matière a deux propriétés essentielles : *l'étendue* et *l'impénétrabilité*; ce ne sont pas des propriétés, c'est une défi-

nition. On conçoit l'impénétrabilité; on l'appelle matière, et voilà tout.

Nous pouvons concevoir l'espace limité ou indéfini, et nous pouvons comprendre de même que l'impénétrabilité soit limitée ou indéfinie, qu'elle occupe un petit volume comme une goutte d'eau, ou un grand volume comme le globe de la terre. Ici se présente une autre idée fondamentale : nous pouvons concevoir que l'impénétrabilité soit continue et inséparable, ou bien qu'elle soit discontinue, et, par conséquent, séparable. L'impénétrabilité inséparable est ce qu'on appelle un *atome*. L'idée de grandeur ou de petitesse n'entre pour rien dans la conception d'un atome, non plus que l'idée de forme : on peut concevoir un atome très-petit ou un atome grand comme une montagne; on peut concevoir qu'il soit rond, carré, pointu, ou de toute autre forme bizarre que l'imagination se plaira à inventer. Seulement nous supposons bien que le monde entier n'est pas un grand atome, et que la matière n'est pas tout d'une pièce; car la terre et la lune sont deux fragmens séparés, et à la surface de la terre nous voyons que la matière en général se brise et se désunit : ce qui prouve assez, d'après notre définition, que la terre non plus n'est pas un atome. Sur le reste, c'est à l'expérience à nous instruire : s'il y a des atomes d'une grandeur sensible, nous les verrons et nous pourrons constater leur forme; mais si tous les atomes de la matière sont tellement petits et ténus que l'expérience directe ne puisse pas nous les faire voir, alors nous serons fort embarrassés de prendre un parti, et nous trouverons qu'il est bien plus facile de concevoir les atomes que de prouver leur existence. C'est là précisément l'indécision dans laquelle se trouvent les physiciens et les chimistes; par aucun moyen on ne peut rendre un atome perceptible, et nos sens ne peuvent rien pour résoudre la question d'une manière directe. Cependant l'ensemble des phénomènes indique, sinon d'une manière certaine, du

moins d'une manière très probable, que la matière n'est pas indéfiniment séparable en parties, qu'à un certain degré de petitesse, qui est bien au dessous de ce que nos sens peuvent saisir, il y a de dernières parties qui sont absolument inséparables et qui sont de véritables atomes. Toutes les découvertes récentes semblent confirmer cette opinion, et c'est aujourd'hui celle qu'on adopte exclusivement. Elle est très-commode en physique; mais ce ne serait pas une raison de l'adopter, si d'ailleurs on ne prouvait pas qu'elle est la plus vraisemblable; car on sait bien qu'en toutes choses les explications qui semblent les plus commodes ne sont pas toujours celles qui sont au fond les plus vraies.

Ainsi, nous admettons l'existence des atomes, comme une vérité fondamentale qui doit nous servir de guide dans nos recherches. Une réunion d'atomes est ce qu'on appelle un *corps*. Les corps auront en général un plus grand ou un plus petit volume, suivant qu'ils seront composés d'un nombre d'atomes plus grand ou plus petit; ils auront des apparences différentes, si les atomes sont diversement arrangés pour les composer; ils auront une différence un peu plus marquée, si les atomes diffèrent par leur forme ou leur grandeur, et enfin ils pourront être essentiellement différens, s'il existe des atomes qui diffèrent par leur nature substantielle.

Dans un volume donné d'un corps, dans une boule d'or, par exemple, on ne suppose pas que tous les atomes soient arrangés de la même manière, et tous également distans les uns des autres; mais on est conduit à supposer que plusieurs atomes sont groupés de manière à former ce qu'on nomme une *molécule*, une *particule*, et que les molécules sont groupées à leur tour pour donner au corps sa structure et son ensemble. Ainsi deux molécules ont en général bien plus de distance entre elles que n'en ont entre eux les atomes qui les composent. C'est là le sens propre

qu'on attache à ces mots, *molécules* et *particules*, qui sont à peu près synonymes; mais quelquefois on les prend dans un autre sens : comme quand on dit, les molécules des corps sont ébranlées par le choc, elles sont en vibration dans les corps sonores, elles sont dilatées par la chaleur, traversées par la lumière, etc.; alors on ne veut plus parler strictement de chaque groupe d'atomes en particulier, mais on veut parler, d'une manière vague, de petites portions que l'on conçoit dans l'intérieur des corps et que l'on sépare par la pensée. Enfin, quand on brise un corps, on se sert encore des mots molécules et particules pour en désigner les plus petits fragmens.

Nous n'observons que trois états différens dans tous les corps qui sont soumis à nos observations; ils sont *solides*, comme les pierres, les métaux et les tissus organiques; ils sont *liquides*, comme le mercure, l'eau, l'esprit-de-vin ou les fluides des corps vivans; enfin ils sont *gazeux*, comme l'air. Les liquides et les gaz se désignent quelquefois par un nom commun; on les appelle des *fluides*. Une chose digne de remarque, c'est qu'un même corps peut être tantôt solide, comme la glace, tantôt liquide, comme l'eau, tantôt gazeux, comme la vapeur. Nous verrons dans quelles circonstances se produisent ces mutations; pour le moment, il suffit de les indiquer, parce qu'elles sont connues de tout le monde, et parce qu'en y réfléchissant on habitue l'esprit à pénétrer dans l'intérieur des corps et à bien comprendre qu'ils ne sont que des assemblages ou des agglomérations d'atomes; que ces atomes sont séparés les uns des autres, et maintenus à des distances plus ou moins grandes, et qu'enfin il est possible que, sans se toucher, ils agissent de concert, et se communiquent des pressions ou des mouvemens.

5. *Des Forces.* — Les atomes simplement posés à côté les uns des autres ne pourraient constituer ni les corps solides, ni les autres corps de la nature; ils

ne feraient tout au plus qu'un amas incohérent et instable, pareil à un monceau de sable ou de poussière. Une pierre ou un morceau de fer sont des corps solides et résistans : il faut donc qu'il y ait *quelque chose* qui retienne les atomes, qui les attache l'un à l'autre, qui les fixe à leur place. Les corps se briseraient sans effort, s'il n'y avait que des atomes simplement juxtaposés, ou plutôt il n'existerait pas de corps; il n'existerait que de la poussière. Nous concevons que dans un morceau de fer un atome quelconque est pressé contre les atomes voisins comme un bloc de pierre est pressé contre le sol; pour soulever la pierre il faut un certain effort; pour arracher l'atome si on pouvait le saisir, il faudrait aussi un effort plus ou moins grand. Ces pressions sont des effets qui pourraient ne pas être et qui supposent par conséquent qu'il y a des causes pour les produire. Ces *causes*, quoique très différentes dans leur nature, sont ce que l'on appelle en général des *forces*.

Ainsi, il y a des forces qui agissent sur les atomes de fer, qui les pressent les uns contre les autres, qui les retiennent en leur lieu, et qui donnent à la masse cette fixité que nous observons. De même, il y a des forces qui agissent sur les molécules de tous les corps solides et qui leur donnent, à l'intérieur, une structure déterminée, et à l'extérieur une forme permanente. Enfin, comme il n'y a pas de corps qui n'ait une certaine manière d'être, et une certaine dépendance entre ses parties, on en conclut que, là où il se trouve plusieurs atomes voisins, il y a toujours entre eux une action mutuelle, par laquelle ils se sollicitent les uns les autres et prennent un arrangement déterminé.

Les liquides, qui sont si mobiles, ont eux-mêmes cette dépendance entre toutes leurs parties voisines : une goutte d'eau a toujours une forme particulière, soit qu'on l'observe sur quelque surface, ou plutôt sur les plantes où

elle se dépose en rosée, soit qu'on l'observe aux extrémités des corps où elle se tient suspendue. Cette forme qu'elle prend est le résultat de l'action de ses molécules, car sans actions mutuelles, elles resteraient séparées et tomberaient isolément.

L'air, qui est invisible et qui est si subtil, n'est pas une exception à cette loi générale. Il est impénétrable, puisqu'il résiste quand il est enfermé dans une vessie, dans un ballon ou dans un autre espace quelconque. Donc il est aussi composé d'atomes et de molécules; donc ses diverses parties exercent aussi une action mutuelle les unes sur les autres : entre mille phénomènes qui en sont la preuve, nous citerons seulement le phénomène de la respiration, que tout le monde peut observer. L'air extérieur pénètre dans les poumons, à mesure que la poitrine s'ouvre pour le recevoir; ainsi les molécules du dehors agissent sur les molécules du dedans, elles les pressent et les forcent d'entrer; et, quand l'air est enfermé dans la poitrine, les molécules intérieures réagissent aussi les unes sur les autres, pour en remplir toute la capacité, comme elles réagissent les unes sur les autres, pour se répandre dans toute l'étendue d'un vase, quelque petit ou quelque grand qu'il soit. Ces forces, qui agissent sans cesse dans l'intérieur d'un corps entre toutes les molécules voisines, ou entre tous les atomes qui composent une molécule, s'apellent *forces moléculaires*, ou *attractions moléculaires*; il serait mieux de les appeler *actions moléculaires*, ou *forces atomistiques*, ou *forces constitutives* des corps, puisqu'en effet ce sont ces forces qui donnent aux corps leurs constitutions particulières et leurs modes d'existence. Nous examinerons plus tard s'il n'y a qu'une seule force de cette nature, ou s'il y en a plusieurs qui se combattent, qui se balancent, et qui sont tour à tour plus grandes ou plus petites.

Outre les forces moléculaires, il y a des forces d'une

autre nature : les corps tombent d'eux-mêmes, quand on les abandonne; les rivières coulent sans cesse; le soleil semble tourner autour de la terre : voilà des *mouvemens* que nous observons, et nous jugeons dans notre pensée que la matière pourrait *exister* sans que ces mouvemens fussent *produits*. Ils ne sont donc que des *effets* accidentels dus à des causes déterminées. Ces causes du déplacement des corps ou des *mouvemens de translation* s'appellent aussi des *forces* ou des *puissances*. Elles ont sans doute des rapports avec les forces moléculaires, qui peuvent aussi, dans certains cas, imprimer des mouvemens de translation; mais en général on les distingue, comme nous le verrons plus loin.

6. *Du Repos et du Mouvement.* — Les idées de *repos* et de *mouvement* sont, comme l'idée d'impénétrabilité, des conceptions simples et primitives, qui ne peuvent ni se décomposer ni se définir. On conçoit le repos, on conçoit le mouvement, on peut aider un esprit à comprendre ces choses d'une manière plus générale ou plus féconde; mais dans aucune langue on ne peut les expliquer ni l'une ni l'autre que par des mots équivalens. Dès que nous avons l'idée d'espace et l'idée de nous-mêmes, nous nous prenons pour un centre autour duquel l'espace indéfini se développe, et nous avons l'idée de direction, de distance et de situations respectives. Nous avons besoin de l'aspect du ciel pour nous *orienter* par rapport au soleil et aux astres; mais nous n'avons besoin que du sentiment de nous-mêmes pour nous *orienter* par rapport à nous : à moins de tout confondre, nous ne confondons pas l'espace qui est devant nous avec l'espace qui est au dessus de nos têtes ou sous nos pieds, ni celui qui est à droite avec celui qui est à gauche. L'homme qui a vécu dans les ténèbres, soit à la surface de la terre, soit au fond des mines, ne sait ce que c'est que l'orient, l'occident ou les pôles du monde, toutes choses qui se rap-

portent à l'aspect du ciel qu'il ne connaît pas; cependant il conçoit l'espace, et par la pensée il le sépare en diverses régions qui ont rapport à lui-même; en régions latérales, antérieures et postérieures, et en régions hautes ou régions basses. Nous pouvons tous faire abstraction de la matière sans pouvoir jamais faire abstraction de nous-mêmes; et, une fois que nous avons de la sorte pris possession de l'espace, nous pouvons comprendre que rien ne change plus ni en nous ni autour de nous : nous avons alors l'idée de *repos* et de *repos absolu;* car on appelle repos absolu d'un corps la persistance réelle de ce corps dans le même lieu de l'espace. De même, nous pouvons comprendre qu'il arrive un changement de place; nous pouvons comprendre que nous avançons ou que nous reculons dans une de ces régions idéales; que nous allons d'un côté ou de l'autre; que nous montons ou que nous descendons : alors nous avons l'idée du *mouvement* et l'idée de *mouvement absolu*; car on appelle *mouvement absolu* d'un corps le déplacement réel de ce corps dans l'espace. Il y a deux choses essentielles à considérer dans le mouvement: sa direction et sa lenteur ou sa rapidité, qu'il ne faut pas confondre avec sa vitesse dont nous parlerons plus loin. Si le *mobile*, ou le corps qui se meut, parcourt une ligne droite, le mouvement est dit *rectiligne*, et la droite parcourue par le mobile est la direction du mouvement; au contraire, si le mobile parcourt une courbe quelconque, le mouvement est dit *curviligne*, et l'on dit encore que la courbe qu'il parcourt est en général la direction du mouvement. Mais dans ce dernier cas, pour exprimer sa direction dans un instant quelconque, il faut remarquer qu'entre deux points d'une courbe, on peut mener une infinité de tangentes ou de lignes droites qui ne font que toucher la courbe; alors le mobile étant en même temps sur la courbe et sur une tangente, on dit que la direction de son mouvement est celle de la tangente sur

laquelle il se trouve. Ainsi, dans le mouvement curviligne, le mobile change à chaque instant de direction, et s'il parcourt un cercle entier, il a véritablement passé par toutes les directions possibles. Pour la lenteur et la rapidité du mouvement, on dit en mécanique, comme dans le langage ordinaire, qu'un mouvement est plus lent quand le mobile parcourt moins d'espace dans le même temps, et qu'il est plus rapide quand il parcourt un espace plus grand. Seulement il faut prendre garde que de deux mouvemens donnés, celui qui serait le plus lent, en ne considérant que les espaces parcourus pendant une seconde par exemple, pourrait être le plus rapide, si l'on considérait les espaces parcourus pendant une heure ou pendant un jour; car on conçoit qu'un même mouvement ment peut se ralentir avec le temps ou devenir plus rapide.

Le repos absolu et le mouvement absolu ne sont que des conceptions de notre esprit : dans l'arrangement du monde, il n'y a rien d'absolu pour nous; tout est relatif et conditionnel. Ainsi, toutes les choses qui nous paraissent les plus immobiles à la surface de la terre ne sont que dans un repos relatif. Les arbres sont en repos par rapport aux montagnes, et les montagnes sont en repos par rapport au sol et à la masse du globe; mais les arbres et les montagnes sont emportés avec nous dans le vaste orbite de notre planète, et tous ensemble nous parcourons en une seconde dix fois plus d'espace que n'en parcourt dans le même temps un boulet qui sort du canon. Cependant, en parcourant aussi vite les espaces du ciel, nous ne pouvons pas juger de notre mouvement absolu, car il faudrait savoir si le soleil est immobile au centre du monde. Or, tout semble annoncer que le soleil emporte avec lui toutes les planètes, comme la terre emporte avec elle son atmosphère et ses nuages, ses arbres et ses montagnes. Le soleil lui-même n'est qu'une planète imperceptible, par

rapport à un autre soleil autour duquel il tourne, et cet autre soleil est sans doute emporté lui-même dans l'espace, sans qu'on puisse assigner ni même imaginer un centre fixe autour duquel toutes ces révolutions s'accomplissent.

7. *De l'Inertie.* — Il y a deux manières de concevoir les forces qui agissent sur la matière inorganique. On peut supposer qu'elles ont une existence séparée, qu'elles sont hors de la matière, et qu'elles en sont indépendantes; ou bien on peut admettre qu'elles sont inhérentes à la matière elle-même, et qu'elles ne sont que des propriétés permanentes, qui lui ont été primitivement données. Ces deux suppositions reviennent au fond à une seule et même chose; mais, quelle que soit l'idée qu'on puisse prendre de leur origine et de leur mode d'existence, il y a sur elles et sur la matière deux principes fondamentaux qui résultent de tous les phénomènes naturels qui se produisent à nos yeux, et qui se renouvellent ou se perpétuent depuis tant de siècles. Ces deux principes constituent ce qu'on appelle l'*inertie* de la matière. Le premier est que, toutes les forces qui agissent sur la matière cessant d'agir à un instant donné, la matière conserve son état de repos ou de mouvement. Le second est que toutes les forces sont soumises à des lois d'une infaillible stabilité. Il résulte du premier principe qu'un atome de matière ne peut ni se donner du mouvement ni altérer celui qu'il aurait reçu; et si deux atomes de matière peuvent se donner du mouvement l'un à l'autre par leurs attractions, ou en général par leurs actions mutuelles, comme l'attraction de la terre donne du mouvement à une pierre qu'on abandonne à elle-même, il résulte du second principe que ce mouvement se produit suivant une loi déterminée qui n'a éprouvé aucun changement depuis que le monde existe. Ainsi, tous les changemens que subit la matière, soit dans son état, soit dans son repos, soit dans son mouvement, nous devons les attribuer à des causes ou

à des forces particulières; tantôt à des forces nouvelles qui surviennent tout à coup, tantôt à des forces permanentes qui continuent d'agir, et qui règlent leurs actions suivant les lois immuables auxquelles elles sont soumises. Si un corps se brise ou se déplace, s'il devient plus dur ou plus mou, s'il se refroidit ou s'il s'échauffe, s'il se liquéfie ou s'il se vaporise, c'est qu'une cause est survenue qui lui imprime ces modifications. Jamais une pierre ne s'est brisée d'elle-même, jamais elle ne s'est soulevée sur le sol, jamais on ne l'a vue ni se durcir, ni se ramollir, ni s'échauffer, ni se refroidir, ni se liquéfier d'elle-même, ni disparaître en vapeurs. Si lo'n coupe le fil qui soutient un corps, l'on le voit qui tombe et qui se précipite d'un mouvement de plus en plus rapide. Il fallait une cause pour le faire tomber, et c'est cette même cause qui continue d'agir et qui presse son mouvement par ses actions répétées. La terre, dans son orbite autour du soleil, éprouve des variations perpétuelles : tantôt sa course devient plus lente, tantôt plus rapide, et cependant rien n'est accidentel dans ces périodes; rien n'est fortuit ni imprévu. C'est toujours la même cause qui préside à ces mouvemens; mais c'est une cause qui change d'énergie, et c'est par la loi de ces changemens que se maintient l'équilibre du monde.

CHAPITRE II.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES CORPS.

Divisibilité. — Porosité. — Compressibilité. — Élasticité. — Dilatabilité.

8. On appelle propriétés générales des corps celles qui sont communes à tous les corps, quel que soit l'état sous lequel ils se présentent. Celles de ces propriétés qu'il importe le plus de connaître dès le commencement de la physique sont :

1° La divisibilité;
2° La porosité;
3° La compressibilité;
4° L'élasticité;
5° La dilatabilité.

On pourra remarquer qu'elles dépendent de la structure des corps et de l'arrangement intérieur de leurs parties constituantes. Si les corps n'étaient pas composés, ils ne seraient pas divisibles, ni poreux, ni compressibles, et ils ne pourraient pas non plus avoir le ressort qui constitue l'élasticité, ni la faculté d'augmenter de volume, qui constitue la dilatabilité. C'est pour cette raison qu'il ne serait pas exact de dire que ces propriétés sont des propriétés générales de la matière, car elles ne peuvent en aucune sorte appartenir aux atomes, tels que nous les pouvons comprendre et tels que nous les avons définis : ce sont des propriétés de l'ensemble, et non pas des propriétés des élémens.

9. *Divisibilité.* — Tous les corps peuvent être divisés en plusieurs parties, et ces parties elles-mêmes en particules de plus en plus petites, jusqu'à ce qu'enfin elles échappent

à nos sens et à nos instrumens. Cette propriété, prise en général, est la chose du monde la plus connue : chacun sait que les barres de métal se rompent sous un certain effort, que les pierres se cassent sous le marteau, et que le diamant, qui est le plus dur et le plus inaltérable des corps que l'on connaisse, peut être lui-même réduit en fines poussières qui servent à polir sa surface. Mais ce qui doit nous occuper, et ce qui a dû surtout exciter la curiosité des plus anciens observateurs, c'est de savoir si tous les corps sont en effet divisibles, et s'ils le sont tous jusqu'au dernier degré de petitesse que nous puissions percevoir.

Pour les corps qui sont liquides comme l'eau, il est évident qu'ils peuvent être divisés et subdivisés en particules si petites qu'elles soient à la fin tout ce que le toucher peut sentir de plus ténu et tout ce que l'œil peut voir de plus délié; car en les regardant nous ne voyons sur leur surface aucune sorte d'inégalité, et en plongeant la main dans leur masse nous ne pouvons pas palper leurs molécules et les sentir distinctement, comme nous sentirions des parcelles de sable.

Pour les solides, nous ne pouvons pas juger aussi facilement de la grosseur ou de la ténuité des dernières parties qui les composent. Rien ne nous indique d'avance que parmi ces corps il ne s'en trouve pas qui, étant divisés jusqu'à une certaine limite, se refuseraient à une division ultérieure, et dont les parties élémentaires, encore grosses et palpables, ou du moins très-perceptibles, ne pourraient plus être ni subdivisées davantage ni altérées en aucune manière. Aussi les anciens avaient eu grand soin d'expérimenter, dans cette vue, sur tous les corps qu'ils connaissaient; et les modernes, qui ont tiré du sein de la terre tant de substances nouvelles, les ont de même éprouvées pour savoir jusqu'à quel point elles se divisent. Ce n'est qu'après toutes ces expériences qu'il a été permis de conclure que pour tous les corps connus il n'y a aucune limite percep-

tible à la divisibilité. Cependant il ne serait pas rigoureux d'étendre cette conséquence à tous les corps qui existent : par cela seul qu'il a fallu l'expérience pour résoudre la question, la question n'est résolue rigoureusement que pour les corps sur lesquels on a expérimenté. Ainsi, il n'est pas impossible que les volcans fassent sortir un jour des entrailles de la terre quelques substances dont les atomes soient pour nous d'une grandeur perceptible, et peut-être de telles substances se trouvent fort communément dans la masse des autres planètes.

Dans l'impossibilité de reproduire toutes les expériences qui ont été faites sur tous les corps connus, nous devons nous borner à citer quelques-uns des exemples les plus frappans, pour montrer, d'une part, que nos sens ne peuvent atteindre qu'à un certain degré de petitesse, et, d'une autre part, que ces dernières parcelles qui commencent à nous échapper sont encore composées d'un nombre immense de parties distinctes.

C'est par le sens du toucher et par celui de la vue que nous jugeons de la grandeur des objets; le goût et l'odorat nous instruisent de leur présence, sans rien nous apprendre de leur forme; et ce qui est une chose digne de remarque, c'est que par le sens de l'ouïe, qui est chez les aveugles un instrument d'une si merveilleuse délicatesse pour juger des distances, nous ne pourrions jamais nous élever à l'idée d'une figure déterminée, ni à l'idée de la grandeur, ni à celle de la petitesse.

Le sens du toucher est répandu dans tout le corps, soit à l'intérieur, soit à la surface; mais il s'exerce très-différemment dans les différentes parties. A l'intérieur, nous n'avons que des sensations vagues des corps étrangers qui nous touchent ou qui nous blessent : et dès que le contact est un peu prolongé, toute sensation locale disparaît; nous n'éprouvons plus qu'un sentiment général, une manière d'être plus ou moins douloureuse, dont nous ne démêlons

ni le siége ni la cause. C'est sans doute par une raison semblable que nous ne sentons rien en dedans de nous-mêmes, ni les substances solides, comme les os, ni les substances liquides, comme le sang, même quand elles circulent avec une grande rapidité. A l'extérieur, tous les points de la surface peuvent sentir distinctement le contact des corps étrangers; mais c'est la main qui est le véritable organe du toucher; on sait que c'est par elle que nous prenons l'idée des contours et des formes géométriques des corps, et que c'est par elle aussi que nous pouvons percevoir les objets les plus déliés. Sur une surface polie, la main exercée d'un aveugle peut sentir des grains de poussière d'une telle ténuité qu'il en faudrait des centaines rangées à côté l'un de l'autre pour faire la longueur d'une ligne. Une main moins délicate peut sentir distinctement un fil de laine ou un fil de soie d'un seul brin, et cependant ces fils n'ont pour l'ordinaire que les dimensions suivantes :

Diamètres en millimètres.

Laine ordinaire. . . . $0^{mm},05$ ou $\frac{5}{100}$ de millimètre.

Mérinos. . . . . $0^{mm},02$ . . $\frac{2}{100}$ . . .

Soie. . . . . $0^{mm},01$ . . $\frac{1}{100}$ . . .

La plupart des fourrures recherchées, comme le castor et l'hermine, ont une finesse qui est comprise entre le mérinos et la soie, et la plupart des laines de différentes espèces sont comprises entre le mérinos et la laine ordinaire. Ces filamens, qui ont une si grande finesse et qui sont à peu près les dernières grandeurs que le toucher puisse percevoir, sont cependant des corps très-composés; chacun d'eux a une structure particulière que le sens de la vue peut seul nous faire connaître; chacun d'eux contient des élémens très-divers, qui sont préparés par la nutrition, sécrétés par les organes, et que la chimie peut séparer de nouveau et remettre en évidence.

Le verre, qui est un produit de l'art, et dans la composition duquel il entre plusieurs substances différentes, peut être filé comme la soie. Pour en faire l'expérience, on prend un tube de verre assez fin, on le présente, vers le milieu de sa longueur, à la flamme d'une bougie, et quand il est chauffé dans cet endroit jusqu'au rouge-blanc, on tire les deux moitiés comme pour les séparer; alors il se fait entre elles un fil d'une brasse de longueur, qui a toute la finesse de la soie, et qui en a presque la souplesse; cependant ce filament de verre est encore assez épais pour fermer lui-même un tube ayant ses parois et son canal intérieur par lequel on peut faire passer des liquides.

Nous pourrions pousser bien plus loin les expériences sur notre sensibilité organique, si les corps ne devenaient pas trop flexibles à mesure qu'on les divise en filamens plus minces. Si, par exemple, un fil mille fois plus fin qu'un fil de soie pouvait avoir la rigidité d'une flèche, il serait curieux d'observer l'effet de ses piqûres sur les divers points de la peau; on trouverait sans doute qu'une flèche de cette espèce pourrait nous traverser le corps de toutes parts, sans se faire sentir et sans troubler le moins du monde les fonctions de la vie.

Le poli que prennent les corps est une autre preuve de la divisibilité de la matière, et le contact des surfaces polies est une autre preuve de la limite des perceptions du toucher.

L'acier poli, les métaux, le diamant et les pierres précieuses ne sont pour la main qu'une seule et même chose; en les touchant nous ne sentons qu'une surface géométrique, et cependant toutes ces superficies sont travaillées avec les fines poussières de l'émeri ou du diamant, et chaque grain de poussière y trace un sillon proportionné à sa grandeur; voilà des cavités et des saillies que le toucher ne peut plus sentir.

Les dernières parcelles de matière qui échappent au toucher sont encore perceptibles à la vue. L'œil aperçoit sur

la pierre de touche les parcelles d'or qui servent à l'essai, et dont la main la plus délicate ne sentirait pas la présence. Les bulles de savon qui donnent de si brillantes couleurs sont de minces lames d'eau, dont Newton a mesuré l'épaisseur. Auprès de leur sommet elles n'ont ordinairement que $\frac{1}{10000}$ de millimètre, et elles se réduisent à $\frac{1}{100000}$ quand elles laissent voir une tache noire quelques instans avant d'éclater. Les ailes transparentes des insectes n'ont qu'une épaisseur à peu près pareille, et c'est pour cette raison qu'elles brillent du même éclat. Enfin les pellicules de verre que l'on souffle à la lampe ont aussi la même ténuité et les mêmes couleurs; car c'est une loi générale que tous les corps transparens se colorent des plus vives nuances quand ils n'ont plus que quelques cent-millièmes de millimètre d'épaisseur; mais quand ils sont plus minces ils deviennent tout-à-fait invisibles. Une bulle de savon qui n'aurait que $\frac{1}{1000000}$ de millimètre d'épaisseur ne pourrait être aperçue par aucun moyen, lors même qu'elle aurait un pied de diamètre.

Pour les corps qui ne s'étendent pas en superficie, et qui ne sont grands que dans une seule dimension, comme les fils de métal ou les filamens organiques, il serait difficile d'assigner les limites de grandeur où l'on cesse de les voir nettement à l'œil nu. Ces limites dépendent de la perfection de l'organe et de l'éclat de la lumière; mais au moyen de loupes et de microscopes il n'est pas besoin d'être fort exercé ni d'avoir un organe très-parfait pour apercevoir d'une manière distincte des fils qui n'ont de diamètre que quelques millièmes de millimètre.

On sait que dans les arts on emploie des fils de cuivre, de fer ou d'argent qui sont aussi fins que des cheveux. La traction qu'on exerce pour les passer à la filière est ce qui limite leur finesse, parce qu'ils deviennent trop faibles pour y résister; mais par divers procédés ingénieux qui ne s'appliquent qu'à certains métaux, on parvient à faire des

fils qui sont plus fins que la soie. Le docteur Wollaston a fait des fils de platine qui n'avaient que $\frac{1}{1200}$ de millimètre d'épaisseur, c'est-à-dire qu'il faudrait plus de cent quarante de ces fils pour former un faisceau de la grosseur d'un fil de soie d'un seul brin. Quoique le platine soit le plus pesant de tous les corps connus, trois mille pieds de longueur d'un tel fil ne pèsent pas plus d'un grain. Pour arriver à ce résultat, qui paraît être le dernier terme que l'art puisse atteindre, le docteur Wollaston prend un fil de platine de $\frac{1}{100}$ de pouce anglais d'épaisseur, qu'il fixe dans l'axe d'un moule cylindrique de $\frac{1}{5}$ de pouce de diamètre; il remplit le moule d'argent en fusion, et il a ainsi un cylindre d'argent dont l'axe est en platine. En le faisant passer à la filière, les deux métaux s'allongent également et conservent leurs rapports d'épaisseurs; enfin, quand le fil composé est à son plus grand degré de finesse, on le fait bouillir dans l'acide nitrique, qui dissout l'enveloppe d'argent, et qui met à nu le fil de platine.

Puisque la matière peut s'amincir en superficie comme dans les bulles de savon ou les lames de verre, et se rétrécir en longueur comme dans les fils de platine, il est évident qu'elle peut s'atténuer de la même manière dans toutes les dimensions. Ainsi, nous pouvons juger que toutes les parcelles que nous apercevons encore sont des parcelles très-composées. Mais le règne organique nous en offre des preuves encore plus frappantes. On sait maintenant d'une manière certaine que le sang n'est pas un liquide uniforme tel qu'il paraît à la vue, et que sa substance se compose d'une foule de petits globules flottant dans un liquide particulier qu'on appelle le *sérum*. Cette découverte a été faite à peu près à la même époque en Italie par Malpighi, et en Hollande par Leenwenhoeck vers 1660, environ quarante ans après que Harvey eut démontré la circulation du sang. Ces globules sont sphériques dans le sang de l'homme et dans celui des mammifères, et ils sont allongés dans les

oiseaux et les poissons. Leurs dimensions varient suivant les espèces; dans le callitriche d'Afrique, ils sont les plus gros que l'on ait observés, et s'élèvent à $\frac{1}{125}$ de millimètre : dans la chèvre, ils sont les plus petits, et ne vont qu'à $\frac{1}{350}$. Les globules du sang de l'homme sont intermédiaires, et paraissent constamment de $\frac{1}{150}$ de millimètre. On peut calculer d'après cette donnée qu'il y en a près d'un million dans la goutte de sang d'un millimètre cube, qui pourrait être suspendue à la pointe d'une aiguille. Dans presque tous les autres mammifères, les dimensions des globules paraissent comprises entre les deux dernières limites. Ces globules ne sont pas des atomes, car ils peuvent être brisés par des actions chimiques, et ensuite ils peuvent être reconstruits; et il n'y a aucun doute qu'ils ne donnent naissance à une multitude de parties distinctes quand ils passent dans la nutrition, car les fibres musculaires, et celles des autres tissus, se composent de globules très-différens des globules du sang, et toujours beaucoup plus petits.

Enfin il y a des animaux complets qui sont aussi petits que les globules du sang et que les plus petites choses perceptibles. Nous pouvons les voir et les étudier : mais c'est le dernier terme où la vue puisse atteindre; ce qui est plus petit n'a plus de grandeur pour nos sens et n'a plus de mesure; c'est le commencement de l'indéfini en petitesse où se jette notre pensée, et qu'elle poursuit indéfiniment sans trouver un point où elle se doive arrêter.

Au delà de ce dernier terme de sensibilité organique, tout cependant n'est pas hypothèse et conjecture; ces animalcules sont des êtres et des êtres essentiellement composés de parties; ils sont organisés, puisqu'ils ont la vie et le mouvement; ils sont pourvus de sens, puisqu'ils ont la force et l'instinct. Dans les fluides où ils vivent, ils exécutent, comme les poissons, des mouvemens rapides et variés; ils se dirigent vers un but, ils évitent les obstacles, quelquefois même ils les surmontent; enfin ils ont besoin

d'une proie, et ils savent la chercher et la saisir. Nous verrons en optique que, dans les dernières classes des êtres visibles, les mœurs ne sont pas moins curieuses à observer que dans les classes les plus apparentes; mais dès à présent nous pouvons conclure que, dans le petit tout impalpable qui compose un individu de cette espèce, il y a des choses distinctes, des parties molles et des parties solides, des espèces d'articulations pour les mouvemens et des espèces de canaux pour les fluides; enfin que parmi cette excessive petitesse, il y a une nutrition dans toutes les parties et une circulation nécessaires. Ainsi, le raisonnement poursuit encore la divisibilité de la matière, après que nos sens ne peuvent plus la constater; et comme l'ensemble des phénomènes de la chimie nous conduit à admettre l'existence des atomes, nous arrivons à cette conséquence définitive, que les atomes sont incomparablement plus petits que les dernières parcelles que nous pouvons saisir avec le sens le plus délicat aidé de l'instrument le plus parfait.

10. *Porosité.* — On appelle *pores* les intervalles qui se trouvent entre les diverses parties des corps. Les espèces de trous qu'on observe dans l'éponge ne sont autre chose que des pores d'une grande dimension; les mailles plus serrées, qui composent son tissu, sont des pores un peu plus petits; enfin, il se trouve encore, entre ces mailles et entre les fibres qui les composent, des interstices qu'on appelle aussi des pores, bien qu'ils soient d'une telle finesse qu'ils échappent à la vue. Ainsi, quand nous concevons une éponge d'un certain volume, d'un décimètre cube par exemple, nous pouvons par la pensée pénétrer dans sa structure intérieure, et distinguer, dans cette étendue totale, l'espace qui est occupé par les diverses fibres de l'éponge, et l'espace très-irrégulier et très-sinueux qui reste inoccupé; nous devons même concevoir que chaque fibre, fût-elle fine comme un fil d'araignée, est elle-même composée de parties distinctes, et que ces parties sont encore séparées les

unes des autres, comme les fibres le sont entre elles.

Le volume, qui n'est occupé que par la substance propre d'un corps, est ce qu'on nomme le *volume réel :* l'espace apparent, qui est limité par sa forme extérieure, est ce que l'on nomme le *volume apparent.* Ainsi, le volume apparent diminué du volume réel est précisément le volume total de tous les pores pris ensemble. Quand on presse une éponge, son volume apparent se rapproche de plus en plus de son volume réel ; mais jamais on ne peut la presser au point de ne laisser aucun intervalle entre ses parties. Ainsi le volume réel est une chose que nous concevons très-facilement, mais que nous ne pouvons jamais trouver : c'est pourquoi, quand nous parlons d'un volume, c'est toujours du volume apparent. Ce que nous disons de l'éponge s'applique à tous les corps, quelle que soit leur nature, car nous avons vu par la divisibilité que tous sont composés de parties séparables et par conséquent de parties qui sont distantes les unes des autres ; ainsi dans la réalité tous les corps sont faits comme des éponges. L'acier et le diamant, qui sont les corps les plus durs ; l'or et le platine, qui sont les corps les plus compactes, ont aussi un volume apparent ; il faut de même pénétrer par la pensée dans l'intérieur de leur masse, et voir entre les atomes qui les composent, des intervalles qui sont incomparablement plus grands que les atomes eux-mêmes.

En considérant la porosité dans ce sens le plus étendu, il est rigoureux de dire, comme on le dit d'ordinaire, que tous les corps sont poreux ; mais si l'on n'entend parler que de la porosité au travers de laquelle on peut faire passer des liquides ou des gaz, il n'est pas vrai que tous les corps soient poreux, car il y en a au travers desquels on ne peut faire passer aucun fluide, quelque subtil qu'il soit. C'est cette porosité qui donne passage aux corps étrangers, qu'il nous importe de connaître en ce moment, et nous allons faire voir par des exemples et par des expériences qu'il y a beau-

coup de corps, même des plus compactes, qui se laissent imbiber par les fluides.

Les tissus qui sont un produit de l'art, n'étant autre chose que des assemblages de fibres entrelacées, il n'est pas étonnant que ces fibres laissent entre elles des intervalles où puissent pénétrer les liquides, tels que l'eau, l'huile, l'alcool, etc. Aussi le papier, les feutres et les étoffes sont des corps dont tout le monde connaît la porosité. Il en est de même des corps réduits en poudre; il y a toujours, entre les fragmens, des intervalles où pénètrent les liquides; c'est pour cela qu'un monceau de sable est humide jusqu'à son sommet, et c'est aussi pour cela que le feu se conserve sous la cendre, car si l'air n'arrivait pas jusqu'au charbon, il s'éteindrait à l'instant.

Les filtres dont on se sert dans les opérations des arts et dans les expériences de chimie ne sont autre chose que des corps poreux, dont les pores sont assez grands pour laisser passer les liquides, et assez petits pour arrêter tous les corps étrangers qu'ils tiennent en suspension; c'est pour cela que les liquides filtrés sont parfaitement limpides : les filtres ordinaires sont le papier et le charbon.

Tous les tissus naturels, soit dans le règne végétal soit dans le règne animal, sont aussi très-poreux. Il n'est pas nécessaire de faire des expériences pour le prouver : il suffit de remarquer qu'une plante, un arbre ou un animal; n'était à son origine qu'un embryon d'un très-petit volume, car tous les germes sont petits; que ces corps se développent peu à peu, qu'ils vivent dans toutes les parties de l'intérieur, comme dans celles de l'extérieur, et qu'il faut bien que des fluides puissent circuler entre toutes les fibres pour y porter la nourriture et y entretenir la vie.

On peut dire qu'il y a des canaux particuliers pour cette circulation des fluides nutritifs et des autres fluides essentiels, et que dans la porosité des corps vivans il n'y a rien d'accidentel ni d'irrégulier. Sans doute, un animal ou un

arbre ne sont pas l'ouvrage du hasard; leurs parties matérielles ne sont pas entassées d'une manière confuse, comme les parcelles d'un monceau de sable. Mais ce n'est pas le hasard non plus qui a fait les minéraux et les montagnes; leurs parties matérielles ont aussi un certain ordre, et la porosité, dans un cas comme dans l'autre, résulte de l'arrangement nécessaire que les forces donnent à la matière.

Les corps organiques qui ont perdu la vie conservent encore cette disposition vasculaire; seulement les divers fluides, n'étant plus soumis aux forces particulières qui les dirigeaient, s'infiltrent indistinctement à travers tous les pores qui se présentent; tantôt ils s'exhalent, et le corps vivant se dessèche comme le bois, tantôt ils restent confondus et donnent naissance à une fermentation qui les détruit.

Le bois qui est plongé dans l'eau augmente de poids et de volume; celui qui reste dans l'air, soit dans les constructions, soit dans les ouvrages de menuiserie, se retire dans les temps secs et se gonfle dans les temps humides; tous ces effets résultent de sa porosité, qui est très-grande, et on ne peut y remédier que par des peintures ou des vernis.

Les animaux et les bois pétrifiés sont une preuve frappante de la porosité; puisque la substance qui les pétrifie doit s'infiltrer au travers de la masse et pénétrer toutes les fibres.

Les substances minérales sont plus ou moins poreuses, suivant leur nature et suivant l'arrangement de la matière qui les compose. Les pierres qui sont opaques et celles dont les parties sont très-irrégulièrement arrangées, sont en général les plus poreuses.

La craie et toutes les pierres qu'on nomme calcaires, sont de même nature que le marbre; il n'y a de différence entre elles que dans l'arrangement des parties, et cela suffit pour que leur porosité soit très-différente. Lorsqu'on verse

de l'eau sur un morceau de craie, elle est absorbée à l'instant et pénètre dans les pores; celle qu'on verse sur un morceau de marbre reste à sa surface et n'est point absorbée. De même si on jette un morceau de craie dans un verre d'eau, on voit une foule de petites bulles qui s'élèvent, et si on y jette un morceau de marbre, on n'aperçoit rien de semblable. Ces bulles proviennent de l'air qui remplissait les pores de la craie, et que l'eau en chasse à mesure qu'elle y pénètre. Si on en veut la preuve, il suffit de briser le morceau de craie qui a séjourné dans l'eau; on le trouve mouillé jusqu'au centre, tandis que le morceau de marbre est à peine mouillé au dessous de sa surface. Ce n'est pas que le marbre ne puisse aussi à la longue s'imbiber d'eau; mais pour faire passer les liquides dans les corps qui ne sont guère poreux, il faut en général deux conditions, beaucoup de temps et beaucoup de pression; c'est pourquoi les pierres qu'on tire du fond des rivières ou du fond de la mer sont en général très humides, surtout si elles viennent d'une grande profondeur; car nous verrons qu'à trois ou quatre mille mètres au dessous de la surface de l'eau les corps sont pressés par le poids supérieur du liquide, comme ils le seraient sous une très-forte presse.

Parmi les pierres siliceuses, comme les agathes et les pierres à fusil, il s'en trouve une qu'on appelle *hydrophane*, dont la porosité se manifeste par un singulier phénomène. L'expérience en est curieuse; l'hydrophane, dans son état ordinaire, est demi-transparente; on la plonge un instant dans l'eau, et quand on l'en retire elle est presque aussi transparente que le verre. L'eau a pénétré sa masse comme l'huile pénètre le papier; les bulles d'air qui se dégagent, comme dans l'expérience de la craie, montrent le progrès de l'absorption : leur volume total est égal à celui des pores accessibles à l'eau; mais si on veut avoir ce volume avec plus d'exactitude, il suffit de peser l'hydrophane avant et après l'opération : la différence des poids sera le poids

de l'eau absorbée, et il sera facile d'en conclure le volume.

Il y a beaucoup de phénomènes naturels par lesquels nous pouvons juger que les grandes masses minérales n'ont pas moins de porosité que les petites masses sur lesquelles nous pouvons expérimenter; on sait, par exemple, que dans les grottes les plus profondes, l'eau s'infiltre à travers les parois, et que c'est ainsi qu'elle vient déposer de toutes parts les stalactites, les stalagmites et toutes les autres cristallisations dont l'assemblage offre un spectacle si surprenant. On sait pareillement que les montagnes taillées à pic éprouvent chaque année une sorte d'exfoliation, dont la porosité est une des causes essentielles. Leurs flancs s'imbibent d'humidité, quand ils sont battus par la pluie ou par les vents humides, le froid de l'hiver congèle cette eau et augmente son volume; il en résulte une rupture d'adhérence dans toutes les couches superficielles, et quand vient le printemps, tous ces petits feuillets se détachent peu à peu et tombent jusqu'à l'automne. C'est ainsi qu'au pied des grands escarpemens, s'entassent des couches à peu près de même épaisseur, dont on peut se servir en géologie pour remonter aux temps primitifs où les montagnes ont pris la disposition qu'elles conservent aujourd'hui.

Enfin les métaux eux-mêmes donnent des preuves sensibles de porosité. Une boule d'or, remplie d'eau et soumise à une grande pression, laisse apercevoir, sur tous les points de sa surface, des gouttelettes semblables à celles de la rosée. Cette expérience fut faite, pour la première fois, en 1661, par les académiciens de Florence; elle a été depuis très souvent répétée avec des métaux différens, et toujours avec le même succès.

Il résulte de ces divers exemples de porosité, qu'un grand nombre de corps sont assez poreux pour se laisser pénétrer par les fluides, dès qu'ils sont en contact avec eux; qu'il y en a d'autres qui ne se laissent pénétrer qu'après un

temps plus ou moins long, et sous une pression plus ou moins forte; enfin, qu'il s'en trouve, comme le verre, qui se laisseraient briser plutôt que de se laisser pénétrer. Il est à peine nécessaire de faire remarquer que tous les fluides ne sont pas également subtils pour pénétrer les corps; l'eau, l'alcool, l'éther, les diverses solutions acides ou alcalines ou d'une autre nature, le mercure, l'huile, le soufre fondu, l'air et les différens gaz, ne peuvent pas s'insinuer avec la même facilité entre les interstices des corps. Il est très-heureux, pour les expériences, que le verre soit absolument imperméable à tous les fluides.

11. *Compressibilité.* — La compressibilité est la propriété qu'ont les corps de pouvoir être réduits à un moindre volume apparent.

On sait que les tissus très-poreux sont en même temps très-compressibles; l'éponge peut être réduite au tiers, au quart, ou même au dixième de son volume apparent. Le papier, les étoffes, le bois et tous les tissus qui se laissent pénétrer par les fluides peuvent pareillement diminuer de volume, et perdre par la compression les fluides qu'ils contiennent. Il y a une foule de procédés des arts qui ne sont que des applications de ce principe.

Les pierres elles-mêmes, quand elles sont chargées d'un grand poids, se laissent comprimer jusqu'à un certain point. Les bases les édifices et des colonnes qui en soutiennent la charge en donnent des preuves très-évidentes.

Les métaux sont *écrouis* par la percussion; ils deviennent plus compactes; leurs parties se refoulent les unes sur les autres, et forment une masse plus serrée.

Les monnaies et les médailles reçoivent leurs empreintes sous l'action d'un balancier qui les frappe d'un seul coup; cette pression est si forte qu'elle façonne le métal comme la pression de la main pourrait façonner la cire: et non seulement ils changent de forme, pour se mouler sur les traits les plus déliés de l'effigie que porte le coin, mais encore ils

se compriment de telle sorte, que la pièce frappée a sensiblement moins de volume que celle qui ne l'est pas.

Les liquides sont en général beaucoup moins compressibles que les solides : l'eau ne diminue que très-peu de volume, quand on l'enferme dans une pièce de canon dont les parois ont plus de trois pouces d'épaisseur, et qu'on la comprime par les plus fortes puissances. Le métal éclate avant qu'elle ne soit réduite aux $\frac{19}{20}$ de son volume. Car nous verrons dans l'un des livres suivans qu'elle ne se comprime que de $\frac{48}{1000000}$ pour chaque atmosphère, et qu'il ne faut pas mille atmosphères pour faire éclater un cylindre de bronze de trois pouces d'épaisseur.

L'air et les gaz sont de tous les corps ceux qui se compriment le plus facilement, et ceux qui se réduisent à un moindre volume. On peut le démontrer par un grand nombre d'expériences; mais l'une des plus simples est celle du briquet à air. Cet appareil se compose d'un tube de verre de huit ou dix pouces de longueur, et dont les parois sont très-épaisses (*Fig.* 1); dans son intérieur, qui est parfaitement cylindrique, se meut un piston qui le ferme exactement, dans toutes les positions qu'il peut prendre. Si le tube était rempli d'eau, le piston ne pourrait pas descendre, puisque l'eau est très-peu compressible; mais quand il est rempli d'air, la force de la main est suffisante pour enfoncer le piston et pour réduire le volume à la dixième ou même à la vingtième partie de ce qu'il était d'abord (*Fig.* 2). On sent que la résistance augmente à mesure que l'espace diminue, et qu'elle augmente de plus en plus; mais quelque effort que l'on puisse faire, on ne parviendrait jamais à pousser le piston jusqu'au fond, puisqu'il faudrait pour cela que l'air perdît son impénétrabilité, c'est-à-dire qu'il fût anéanti. Quand le piston reprend sa position primitive, l'air aussi reprend son volume primitif; ainsi il n'est pas compressible à la manière des métaux, qui reçoivent des empreintes, et qui ne reviennent pas à

leur volume primitif quand le balancier cesse de les presser.

Les autres gaz ont la même propriété que l'air, et tous ces corps ne sont pas seulement propres à être comprimés, mais en vertu de leur force expansive, ils sont propres à prendre un volume beaucoup plus grand.

Si au dessus du briquet à air on ajoutait un tube de même diamètre, et qu'au lieu d'enfoncer le piston on le soulevât dans ce nouveau tube (*Fig.* 3), l'air intérieur se répandrait partout, et prendrait un volume dix fois, cent fois, mille fois, etc., plus grand; et même il ne paraît pas qu'il y ait de limite à cette expansion des gaz. Après cela, on pourrait de nouveau enfoncer le piston, et le volume se réduirait de plus en plus; on pourrait le soulever de nouveau et le réduire encore, et ainsi de suite, sans que l'air conservât la moindre trace des divers états de compression ou d'expansion par lesquels on l'aurait fait passer. C'est une constitution très-remarquable, que celle de ces corps qui peuvent prendre ainsi un volume cent mille fois plus grand ou cent mille fois plus petit, sans qu'une action mutuelle entre leurs molécules cesse de s'exercer.

D'après cela, on pensera peut-être que tout l'air de l'atmosphère pourrait être enfermé dans un très-petit espace, comme par exemple dans la capacité d'une outre; mais nous verrons que, s'il n'y a pas de limite à l'expansion, il y a une limite nécessaire à la compression et à la réduction de volume.

12. *Elasticité.* — L'élasticité est la propriété qu'ont les corps de reprendre leur état primitif, quand on fait cesser la cause qui changeait leur forme ou leur volume.

L'air est parfaitement élastique: car si l'on presse une vessie à moitié pleine d'air, elle reprend toujours son état, dès qu'on cesse de la presser: pareillement, quand on a enfoncé le piston du briquet à air, il remonte de lui-même; l'air comprimé le soulève malgré le frottement, et le ra-

mène vers le point de départ. Il en est toujours ainsi quand une cause quelconque agit sur un gaz; dès qu'elle cesse d'agir, le gaz revient exactement comme il était auparavant. C'est pour cela que les gaz s'appellent des *fluides élastiques*.

Les liquides qui ont été comprimés paraissent ne rien conserver non plus des pressions qu'ils ont supportées; ils reprennent leur volume à l'instant même où cesse l'action des causes comprimantes.

Il n'y a pas de corps solide qui soit aussi parfaitement élastique que les gaz et les liquides. Le caoutchouc, ou gomme élastique, est peut-être de tous celui qui a le plus d'élasticité; et cependant, soit par la chaleur, soit par de grandes compressions long-temps prolongées ou souvent répétées, on finit par changer sa forme ou son volume.

Toute imparfaite qu'elle est, l'élasticité des solides n'en est pas moins une propriété très-importante et très-curieuse à observer; nous l'examinerons fort en détail dans l'un des livres suivans. Ici nous nous contenterons de faire voir, par quelques expériences, qu'elle se manifeste à divers degrés dans les différens corps.

L'élasticité de l'ivoire est assez indiquée par les mouvemens singuliers des billes de billard; mais on ne peut la montrer plus directement par une expérience ingénieuse. On laisse tomber une bille ordinaire, ou une bille grosse seulement comme une balle, sur un plan très-uni, où l'on a passé une légère couche d'huile; à l'instant elle se relève et rebondit jusqu'à la hauteur du point de départ, ou à très-peu près. C'est là sans doute une preuve suffisante de son élasticité, et, par conséquent, de son changement de forme; mais si l'on regarde sur le plan, au point où elle a frappé, on y voit une empreinte d'autant plus large que le choc a été plus vif, et qui prouve d'une manière certaine que la bille ne s'est relevée qu'après s'être aplatie, comme ferait une vessie pleine d'air, ou une bulle de savon; car ces bulles si légères peuvent aussi se réfléchir contre les

corps et rejaillir sans se rompre. Des balles de bois, de pierre, de verre ou de métal, se comportent à peu près comme les billes d'ivoire : toutes s'aplatissent plus ou moins avant de se relever, ce qui est une preuve de leur compressibilité; et toutes, quand elles n'ont pas été comprimées trop vivement, rebondissent et reprennent leur forme première, ce qui est une preuve de leur élasticité. Ainsi, dans le jeu des corps élastiques il y a un double phénomène, celui de la compression ou du changement de forme, et celui du rétablissement complet de toutes les parties. Une feuille de papier, ou même une feuille de plomb, ne sont pas des corps sans élasticité; car on peut leur donner de légères flexions, sans qu'elles se rompent et sans qu'elles cessent de reprendre leur position; mais si on les écarte un peu trop, leur élasticité est forcée, elles prennent le nouveau pli, et ne font plus d'effort pour en revenir.

L'élasticité résultant toujours d'un dérangement des molécules, soit qu'il ait lieu par pression ou par flexion, soit qu'il ait lieu par torsion ou par traction, l'on juge aisément qu'il y a, pour chaque corps, des limites à ces dérangemens, et, par conséquent, des limites à l'élasticité. Les corps sont d'autant plus élastiques que ces limites sont plus étendues; ainsi les billes d'ivoire sont plus élastiques que les balles de plomb, car elles reviennent d'une compression plus grande; les lames d'acier plus que celles de verre, car elles peuvent être bien plus fléchies; les fils de soie plus que ceux de cuivre ou d'argent, car ils peuvent être tordus bien davantage; et les cordes de violon plus que les fils de fer, car elles peuvent être bien plus étirées, sans cesser de revenir à leur première longueur. Mais si l'on ne fait éprouver aux molécules d'un corps que le dérangement que son état d'agrégation peut permettre, elles reviennent toujours très-exactement à leur position; et, dans ce sens, on pourrait dire que tous les corps, les solides même, ont une élasticité parfaite.

13. *Dilatabilité.*—La *dilatabilité* est la propriété qu'ont les corps de changer de volume par l'influence de la chaleur, de s'agrandir quand on les chauffe, de se contracter quand on les refroidit, et de reprendre exactement les mêmes dimensions quand on les ramène exactement au même degré de chaud ou de froid.

L'air se dilate si facilement que la simple chaleur de la main augmente de beaucoup son volume. Pour en faire l'expérience, on prend un tube de verre très-long, d'un diamètre intérieur de deux ou trois millimètres, et à l'extrémité duquel on a soufflé une boule. On peut, au moyen de certaines précautions, y faire entrer une colonne de liquide coloré, qui se tienne vers le milieu de la longueur du tube en *m m* (*fig.* 4), et sépare l'air intérieur de l'air extérieur. Cela fait, quand cette colonne est en repos, on approche la main près de la boule, et à l'instant on voit monter la colonne liquide; donc l'air intérieur augmente de volume. Ensuite, en retirant la main, on voit la colonne qui retombe peu à peu, et qui revient enfin à sa première position; ce qui prouve qu'en reprenant le même degré de chaleur, l'air reprend aussi le même volume.

Pour faire la même expérience sur les liquides, on prend un tube semblable au précédent, que l'on remplit d'eau ou de mercure jusqu'au milieu de sa longueur en *m* (*fig.* 5). Ensuite on chauffe la boule en la touchant avec la main, et la colonne monte de plus en plus jusqu'en m'; au contraire, si on la touche avec de la glace, la colonne tombe en m''; et elle retourne encore à sa position primitive quand la glace est éloignée.

Pour les solides, l'expérience peut se faire de plusieurs manières : une des plus simples consiste à prendre une barre de métal qui s'ajuste très-exactement entre deux talons, dressés à angle droit (*fig.* 6) sur une plaque métallique assez épaisse. Si l'on fait rougir la barre, elle devient trop longue pour reprendre sa place, mais elle revient sur

elle-même à mesure qu'elle se refroidit; et enfin quand elle n'a plus que la chaleur qu'elle avait d'abord, elle a repris sa longueur primitive, et retombe entre les points fixes.

Ainsi tous les corps sont dilatables; et de tout ce qui peut changer en eux, leur volume est la chose la plus changeante. A chaque instant du jour ou de la nuit la chaleur varie, soit par l'action du soleil, soit par une foule d'autres causes; et tous les corps qui sont à la surface de la terre participent à ces variations. Ils sont tour à tour plus dilatés ou plus contractés, et n'ont jamais les dimensions fixes que nous leur supposons. C'est par un mouvement de toutes les parties de l'intérieur et de l'extérieur que se produisent ces alternatives; et, si la porosité nous fait voir que ces parties ne se touchent pas, la dilatation nous fait voir maintenant qu'elles ne sont jamais en repos et qu'elles ne gardent jamais ni les mêmes distances ni les mêmes positions relatives. D'où nous pouvons conclure enfin que la matière qui nous semble la plus inerte a une activité perpétuelle dans toute l'étendue de sa masse, parce que toutes ses molécules, soit au dehors soit au dedans, sont soumises à des causes qui agissent sans cesse, et qui peuvent sans cesse éprouver des changemens d'intensité.

CHAPITRE III.

DE L'ÉQUILIBRE ET DU MOUVEMENT.

Notions de Statique.

14. Un corps est en *équilibre*, quand les forces qui le sollicitent se détruisent l'une l'autre, ou quand elles sont détruites par quelque résistance. Ainsi un corps est en équilibre à l'extrémité du fil qui le suspend, parce que la pesanteur, qui le sollicite, est détruite par la résistance du fil et par celle du point de suspension; si le fil n'est pas assez résistant, il se rompt et le corps tombe; si le point d'attache est mal assuré, le corps l'entraîne et tombe avec lui. Quelquefois l'équilibre a lieu sans point fixe et sans résistance apparente : les poissons les plus pesans sont en équilibre dans l'eau; un ballon avec ses agrès, sa nacelle, et les observateurs qu'il emporte, peut aussi être en équilibre dans les airs : mais alors la pesanteur qui sollicite ces corps est exactement détruite par des pressions particulières, comme nous le verrons dans un des chapitres suivans.

On peut dire que tous les corps qui nous paraissent en repos, ne sont en effet que des corps en équilibre; parce qu'ils sont toujours soumis à l'action de plusieurs forces qui se détruisent l'une l'autre.

La *Statique* a pour objet de déterminer les conditions de l'équilibre; et la *Dynamique* a pour objet de déterminer les lois des mouvemens qui se produisent quand les conditions d'équilibre ne sont pas remplies. La *Mécanique* comprend la Statique et la Dynamique, c'est-à-dire les lois de l'équilibre et celles du mouvement.

15. On ne peut mesurer les forces qu'en prenant pour unité une force convenue, comme on mesure les longueurs ou les poids, en prenant pour unité une longueur ou un poids déterminés. De plus, la notion de grandeur ne s'appliquant pas directement aux forces, il faut définir avec précision ce qu'on appelle *forces égales*, *forces doubles*, etc.

Pour que deux forces soient égales, il faut qu'elles se fassent équilibre, lorsqu'on les oppose l'une à l'autre, sur un point, ou aux extrémités d'une droite inflexible. Deux forces égales donnent une force double quand on les ajoute, c'est-à-dire quand on les fait agir dans le même sens et dans la même direction; on aurait une force triple, si l'on faisait agir dans le même sens trois forces égales, et ainsi de suite.

D'après cela si l'on convient de représenter une force par un nombre ou par une ligne, la force double de celle-là sera représentée par un nombre double ou par une ligne double, etc. C'est ainsi que nous pouvons toujours représenter les forces par des grandeurs numériques ou linéaires, et faire sur elles les mêmes opérations que nous faisons sur ces grandeurs.

16. Quel que soit le nombre des forces qui agissent sur un point, et quelles que soient leurs directions, elles ne peuvent, en dernier résultat, imprimer à ce point qu'un seul mouvement, dans une direction déterminée. Or, on conçoit qu'il existe une certaine force qui serait, à elle seule, capable de produire le même effet; et cette force unique qui pourrait remplacer l'ensemble de toutes les autres, est ce qu'on appelle leur *résultante*. Ainsi, quand un bateau se meut à la fois par la force du courant, par la force des rames et par celle du vent, on peut concevoir une force unique, un fil assez fort, par exemple, qui, étant attaché au bateau, serait tiré dans une telle direction et avec un tel effort qu'à lui seul il lui imprimât à chaque instant le même mouvement que toutes ces forces réunies; il en serait la résultante. Le courant, le vent et les rames cessan

d'agir, et le fil dont nous parlons leur étant substitué, rien ne serait changé quant au résultat.

L'ensemble des forces qui concourent à produire un effet se nomme *un système* de forces; ces forces s'appellent aussi des *composantes*, quand on les considère par rapport à la *résultante* qui pourrait les remplacer. Il est évident que, si à un système de forces on ajoutait une force nouvelle, qui fût égale à la résultante et dirigée en sens contraire, l'équilibre aurait lieu dans ce nouveau système de forces. C'est là la propriété caractéristique de la résultante.

Ainsi, dans l'exemple que nous avons choisi, tandis que les forces du courant, du vent et des rames exercent leur action, si l'on ajoutait un fil assez résistant, dirigé en sens contraire de celui qui représente la résultante et tiré avec le même effort, cette nouvelle force produirait l'équilibre. Le bateau serait plus fixé que s'il était à l'ancre; il ne pourrait avancer ni reculer, ni se mouvoir d'aucun côté, jusqu'à ce qu'il arrivât quelque force nouvelle, ou quelque changement dans les forces agissantes pour déranger l'effort par lequel elles se détruisent.

17. *Résultante de plusieurs forces qui agissent dans la même direction.* — Quand toutes les forces qui agissent sur un point tendent à le mouvoir sur une même ligne, il peut se présenter deux cas : 1° Si toutes ces forces agissent dans le même sens, la résultante est égale à leur somme; 2° si elles agissent les unes dans un sens et les autres dans le sens opposé, la résultante est égale à la différence des deux résultantes partielles et agit dans le sens de la plus grande.

18. *Résultante de deux forces qui agissent angulairement sur un même point.* — Deux forces agissent sur le point A (*fig.* 7), l'une dans la direction AX, et l'autre dans la direction AY; la première est représentée en grandeur par AF, et la deuxième par AF′ : il est clair que le point A ne peut se mouvoir, ni suivant AF, ni suivant AF′, et qu'il doit prendre une direction intermédiaire. C'est ce que le

bon sens nous indique d'abord, mais c'est à peu près tout ce qu'il peut nous faire voir; car pour déterminer cette direction moyenne que doit prendre la résultante, et aussi l'intensité qu'elle doit avoir par rapport aux composantes, il faut recourir à des considérations que nous devons supprimer ici. Nous nous contenterons d'énoncer le principe général de la *composition des forces*, parce qu'il est très-simple et très-facile à comprendre. Voici en quoi il consiste. On construit le parallélogramme AFRF′ sur les grandeurs des deux forces données et l'on mène la diagonale AR; cette diagonale représente à la fois la *grandeur* et la *direction* de la résultante. Ainsi le point A, sollicité par les deux forces AF et AF′, est exactement dans le même cas que s'il était sollicité par une seule force, qui serait dirigée suivant AZ, et qui aurait une grandeur égale à AR. Ce principe est vrai, pour les forces égales comme pour les forces inégales; pour celles qui font un angle aigu droit ou obtus, comme pour celles qui font un angle quelconque. C'est le principe fondamental de toute la statique. Il est connu sous le nom de *parallélogramme des forces*.

Quand les deux forces sont égales, la résultante divise toujours leur angle en deux parties égales; mais pour sa grandeur, elle est tantôt égale à celle des composantes, tantôt plus grande et tantôt plus petite (*Fig.* 8, 9 et 10).

Quand les deux forces sont inégales, la résultante divise leur angle en deux parties inégales, et elle est toujours plus rapprochée de la force la plus grande (*Fig.* 11).

19. Puisque deux forces peuvent être remplacées par une seule, réciproquement une seule force peut être remplacée par deux autres. On voit même qu'il y a une infinité de systèmes différens qui peuvent donner lieu à la même résultante (*Fig.* 12), et que réciproquement il y aura une infinité de manières de remplacer une seule force par le système des deux autres, quand on n'exige rien ni sur leur grandeur ni sur leur direction. Mais si l'on demande

par exemple (*Fig.* 13) de remplacer la force AR par deux autres forces, dont l'une soit dirigée suivant AY, et soit d'une grandeur AF′, alors le problème est déterminé, parce qu'il n'y a plus qu'une manière d'achever le parallélogramme et de trouver la composante AF.

20. *Résultamte d'un nombre quelconque de forces agissant au même point.* — Quand on sait trouver la résultante de deux forces qui agissent au même point, on trouve aisément la résultante d'un nombre quelconque de forces ; car on prend la résultante des deux premières, puis la résultante de cette résultante et de la troisième force, puis celle de cette nouvelle résultante et de la quatrième force, et ainsi de suite, en commençant à volonté par l'une ou par l'autre (*Fig.* 14).

21. *Résultante des forces parallèles.* — Quand deux forces parallèles AF et A′F′ (*Fig.* 15) agissent sur une ligne AA′, elles peuvent aussi être remplacées par une force unique qui est leur résultante, et dont on trouve l'intensité, la direction et le point d'application par les principes suivans :

1°. La résultante des deux forces parallèles est égale à leur somme quand elles agissent dans le même sens, et à leur différence quand elles agissent en sens contraire.

2°. Elle est parallèle aux composantes.

3°. Elle est appliquée en un point G, tel que les distances GA et GA′ soient en raison inverse des forces AF et A′F′. Ce point d'application de la résultante s'appelle le *centre des forces parallèles.* Une propriété remarquable de ce point, c'est qu'il reste le même quand les forces changent de direction absolue, en conservant leur parallélisme : car si les mêmes forces agissaient suivant AF$_1$ et suivant A′F′$_1$, leur résultante passerait encore par le point G, puisque les forces n'ayant point changé d'intensité, leurs grandeurs seraient encore en raison inverse des distances GA et GA′.

La résultante d'un nombre quelconque de forces parallèles se trouve en composant d'abord les deux premières, puis leur résultante avec la troisième, et ainsi de suite.

22. *Des Couples.* — Deux forces égales, parallèles et opposées forment ce qu'on appelle un *couple*. D'après ce que nous venons de dire, la résultante d'un couple est égale à *zéro*, et cependant le système n'est pas en équilibre; c'est un des cas très-particuliers où deux forces ne peuvent pas être remplacées par une seule. Un couple peut bien être transformé en un autre couple; on peut même le transformer d'une infinité de manières, mais jamais on ne peut le remplacer par une force unique; et par conséquent, pour un couple, il n'y a jamais de condition d'équilibre. Si on le laisse agir, il fait tourner la ligne AA′ (*Fig.* 16) jusqu'à ce qu'il se soit déployé dans la longueur FF′ (*Fig.* 17). Alors il n'y a plus de couple, et l'équilibre est stable. Si l'on avait reployé le couple dans la position marquée *Fig.* 18, il y aurait aussi équilibre, mais équilibre instable; car en le déployant un peu, il ferait tourner la ligne et se déploierait tout-à-fait.

23. *Levier.* — On appelle *levier* une barre droite ou courbe qui peut tourner autour d'un point fixe, qu'on appelle *point d'appui* (*Fig.* 19 et 20).

Un levier ne peut jamais être en équilibre sous l'action d'un seule force, à moins que le prolongement de cette force ne passe par le point fixe (*Fig.* 21 et 22).

Un levier étant sollicité par deux forces situées dans le même plan, il y a deux conditions pour qu'il reste en équilibre. *Il faut premièrement que ces forces tendent à faire tourner en sens contraire, et secondement que leurs intensités respectives soient en raison inverse de leurs bras de levier.* On appelle *bras de levier d'une force* la longueur de la perpendiculaire abaissée du point d'appui sur la direction de cette force, ou sur son prolongement; ainsi PQ (*Fig.* 23) est le bras de levier de la force AF, et PQ′

celui de la force AF'. Ces deux forces étant supposées dans le même plan, on voit qu'elles tendent à faire tourner en sens contraires et qu'elles remplissent la première condition; mais pour qu'elles remplissent aussi la seconde, il faut *que la première force contienne la seconde, autant de fois que le bras du levier dans la seconde contient le bras de levier de la première.* Si, par exemple, AF est double de AF', il faudra que PQ' soit double de PQ; si AF était mille fois AF', il faudrait que PQ' fût mille fois PQ. Cependant il ne faudrait pas croire que PQ étant d'un mètre, par exemple, et PQ' de mille, un homme qui tirerait suivant AF' pût faire équilibre à mille hommes de même force qui tireraient suivant AF; car en passant à la pratique, il se présente des résistances dont la théorie ne tient pas compte.

24. *Pression sur le point d'appui.* — Dans l'équilibre du levier, le point fixe supporte une certaine pression qu'il est utile de connaître. Pour cela, il suffit de transporter les forces au point de rencontre de leurs directions prolongées (*Fig.* 24), et de chercher leur résultante par la règle du parallélogramme des forces; cette résultante passe par le point d'appui, et exprime par conséquent la grandeur et la direction de la pression qu'il supporte. Si les forces étaient parallèles (*Fig.* 25), on sait, par ce que nous avons dit (21), que la résultante serait parallèle aux composantes et égale à leur somme.

25. Dans l'usage ordinaire, on emploie le levier à soulever des fardeaux; alors l'une des deux forces s'appelle *la résistance*; c'est le fardeau que l'on veut soulever : l'autre s'appelle *la puissance*; c'est la force quelconque qui est mise en jeu pour soulever le fardeau. Dans ce cas, la condition d'équilibre s'exprime en ces termes : *La puissance et la résistance sont en raison inverse de leurs bras de levier.*

On distingue aussi trois sortes de leviers, suivant les positions relatives du point d'appui et des points d'applica-

tion de la puissance et de la résistance. Dans *le levier du premier genre*, le point d'appui est entre la puissance et la résistance; la balance est un levier de cette espèce : dans celui du *deuxième genre*, la résistance est entre le point d'appui et la puissance : dans celui du *troisième genre*, c'est la puissance au contraire qui tombe entre la résistance et le point d'appui.

Nous renvoyons, pour de plus amples détails, à la Mécanique de M. Poisson et à la Statique de M. Poinsot.

26. *Mouvement uniforme.* — Le mouvement uniforme est celui dans lequel le mobile parcourt des espaces égaux en temps égaux. Ainsi, concevons un mobile qui parcourt une ligne droite, et une horloge qui mesure le temps; si, dans chaque minute, le mobile avance de la même longueur, de soixante pieds par exemple, et dans chaque demi-minute de trente pieds, de vingt dans chaque tiers de minute, il se mouvra d'un mouvement uniforme. Puisque les espaces sont égaux pour des temps égaux, il en résulte que le rapport de l'espace au temps est une quantité constante : c'est ce rapport qui s'appelle *la vitesse* du mouvement uniforme. Quand on prend un temps double ou triple, l'espace est double ou triple, et le rapport ne change pas. Le nombre qui représente la vitesse dépend des unités qu'on a choisies pour l'espace et pour le temps, et ce serait mal exprimer la vitesse que de l'exprimer par un nombre, sans désigner les unités qui ont servi à trouver ce nombre. Les mouvemens uniformes sont plus lents ou plus rapides suivant que leur vitesse est plus petite ou plus grande; le vent ordinaire ne parcourt que 60 mètres en une minute, le vent des orages parcourt jusqu'à 2700 mètres; ce dernier mouvement est 145 fois plus rapide que le premier.

27. Puisque la matière est inerte, un corps qui est animé d'un mouvement uniforme doit se mouvoir perpétuellement dans la même direction et avec la même

vitesse, à moins qu'une autre force ne vienne agir sur lui, soit pour changer sa direction seulement, soit pour changer à la fois sa direction et sa vitesse; car, de lui-même, un corps ne peut rien changer, ni à son état de repos ni à son état de mouvement. C'est ainsi qu'il faut entendre l'inertie, et non pas comme l'entendaient d'anciens philosophes, qui voulaient à toute force que la matière eût un penchant pour le repos. Ils comparaient les corps à des hommes paresseux: ceux-ci, disaient-ils, cherchent le repos, ils ont horreur du travail; de même, la matière a horreur du mouvement, elle se hâte d'entrer en repos dès qu'on cesse de la pousser. Ainsi, pour eux, l'inertie signifiait à peu près la même chose que paresse; mais on voit, d'après ce que nous avons dit, que trois choses essentielles constituent l'inertie: 1° la nécessité d'une force pour donner du mouvement à la matière; 2° la permanence du mouvement quand la force a cessé d'agir; 3° la nécescessité d'une force nouvelle pour changer le mouvement qu'elle a reçu.

Lorsque nous voyons un mouvement qui diminue, qui cesse ou qui change d'une manière quelconque, nous pouvons être assurés qu'il y a quelques causes à ces changemens. Une pierre que nous lançons contre le soleil devrait aller jusqu'au soleil, si elle n'était arrêtée par la résistance de l'air et par la pesanteur qui la rappelle vers la terre. Une bille de billard, une fois mise en mouvement, roulerait d'une bande à l'autre sans jamais s'arrêter, si elle n'éprouvait aussi la résistance de l'air, et un frottement plus ou moins considérable sur les filamens du tapis.

28. La plupart des forces qui mettent les corps en mouvement, n'agissent d'une manière directe que sur un petit nombre des molécules qui composent les corps. Ainsi, quand on choque une bille de billard, on ne touche que quelques points de sa surface; quand le vent pousse

un vaisseau, il ne presse que les voiles; et quand la poudre lance un boulet, les gaz qui se développent et qui donnent l'impulsion ne touchent et ne pressent que son hémisphère intérieur. Cependant toutes les parties d'un corps se meuvent; aussi bien les parties sur lesquelles la force n'agit pas, que les parties qu'elle pousse directement. Il faut donc qu'il se fasse un partage du mouvement entre toutes les molécules, et un partage égal, afin qu'aucune ne prenne l'avance et qu'aucune ne reste en retard : celles qui sont directement choquées poussent les voisines, celles-ci les suivantes, et ainsi de proche en proche, jusqu'à ce qu'enfin toute la masse soit ébranlée et que toutes les parties se meuvent d'un commun mouvement. Pour passer d'une molécule à l'autre, et pour se répandre dans toute la masse, le mouvement exige un certain temps qui n'est pas très-grand, mais qui n'est pas non plus infiniment court; la durée de cette diffusion du mouvement est analogue à la durée qui est nécessaire pour qu'un fluide se répande dans un vase et s'y mette de niveau : elle dépend de la masse et de la nature du corps; c'est pourquoi il n'y a jamais de mouvement qui soit absolument instantané. Ce principe s'étend à toute matière, même à celle qui entre dans la composition des corps organiques : dans l'animal le plus vif, le mouvement n'est pas aussi rapide que la pensée, il faut un certain temps très-court pour qu'il prenne son essor et sa vitesse. Un oiseau peut voir la flèche qui vient le frapper, mais la flèche est plus rapide que les contractions musculaires, et n'eût-il qu'à tourner la tête pour éviter le coup, la tête est percée avant que le jeu des muscles ait produit son effet. Il y aurait de curieuses recherches à faire sur la rapidité de la contraction des divers organes dans les divers animaux.

29. *De la Quantité de mouvement.* — Quand une force agit sur un corps, quand le mouvement s'est répandu dans toutes les parties de la masse et que toutes se meuvent

d'une vitesse commune, tout est fini pour la force; elle a produit tout son effet, et l'on peut dire qu'elle est passée dans le mobile, qu'elle s'y est répandue, et qu'elle y reste comme si elle y était enfermée.

Ainsi, le projectile lancé par la main, par un ressort qui se débande, par un choc rapide ou par une explosion soudaine, s'en va, parcourant l'espace, pour obéir à la force qui a produit son effet, et qui, présentement, n'agit plus sur lui. Si ce projectile ne rencontrait rien, ni l'air, ni l'eau, ni aucun fluide, ni aucun corps en repos, ni aucun corps en mouvement, si, en outre, aucune autre puissance n'agissait sur lui, il s'en irait suivant la ligne de l'impulsion qu'il a premièrement reçue, et il la parcourrait d'un mouvement uniforme sans se dévier et sans s'arrêter; après un siècle, comme après une seconde, il aurait encore la même direction et la même vitesse. Cette permanence du mouvement est, comme nous l'avons vu, l'un des attributs de l'inertie; on peut l'exprimer en disant que l'action d'une force ne dure qu'un instant, et que l'effet qu'elle produit *se continue* éternellement.

C'est ainsi que le mobile conserve l'empreinte de la force à laquelle il a été soumis, et l'on conçoit que, la force restant la même, elle produirait des effets très-différens sur des mobiles différens. La charge de poudre qui lance une balle pourrait à peine soulever une bombe, et l'on sait bien que l'arc qui lance au loin une flèche légère ne pourrait pas lancer avec la même vitesse une flèche plus pesante. On entend dire assez généralement que cette différence dépend de la pesanteur; mais c'est une explication fort trompeuse, car elle semble indiquer que, si tous les corps cessaient d'être pesans, ils seraient tous projetés avec la même vitesse; ce qui est une grande erreur. Supposons pour un moment que les corps dont nous venons de parler cessent d'être pesans, supposons même qu'il n'y ait plus d'air qui s'oppose à leur mouvement : il arriverait encore

que la balle irait plus vite que la bombe, et que la flèche de bois serait aussi plus rapide que la flèche de fer; parce que la même force appliquée à des quantités de matière différentes imprime une vitesse d'autant moindre que la quantité de matière est plus grande. Voici sur ce point important un axiome qui est un principe essentiel de mécanique : *Quand une même force agit sur des mobiles différens, elle leur imprime des vitesses qui sont en raison inverse de leurs masses, ou de la quantité de matière qui les compose.* Ainsi la même force d'explosion qui lancerait successivement des balles de plomb dont les volumes, et par conséquent les quantités de matière seraient 1, 2, 3, 4, etc., ne leur imprimerait que des vitesses 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, etc., tellement que la balle dont la masse serait 10 ne recevrait qu'une vitesse $\frac{1}{10}$, celle dont la masse serait 100 ne recevrait qu'une vitesse cent fois plus petite, et ainsi de suite; d'où l'on voit que, pour chacune, la masse multipliée par la vitesse donne le même nombre; car, pour la première, ce produit est $1 \times 1 = 1$, pour la seconde $2 \times \frac{1}{2} = 1$, etc. C'est ce produit de la masse d'un mobile par sa vitesse qu'on appelle *quantité de mouvement.* Il suit de là qu'une même force d'impulsion donne toujours une même quantité de mouvement, quel que soit le projectile qu'elle pousse, et qu'ainsi la quantité de mouvement caractérise une force et devient sa véritable mesure.

On dit qu'une force d'impulsion est double, triple ou quadruple d'une autre, quand elle produit une quantité de mouvement qui est double, triple ou quadruple; d'où résultent ces trois conséquences :

1°. *Que les forces sont entre elles comme les quantités de mouvement qu'elles produisent, ou bien qu'elles sont entre elles comme les produits des masses par les vitesses;*

2°. *Que pour des masses égales, les forces sont entre elles comme les vitesses qu'elles impriment;*

3°. *Que pour des vitesses égales, les forces sont entre elles comme les masses sur lesquelles elles agissent.*

3o. *De la Communication du mouvement.* — Quand un corps en mouvement rencontre un corps en repos ou un autre corps en mouvement, il se produit des effets très-curieux, qui dépendent de l'élasticité, de la dureté et de la masse relative des corps. Jusqu'à présent la science n'est parvenue à faire l'analyse de ces phénomènes qu'en supposant les corps parfaitement élastiques, ou en les supposant complètement dénués d'élasticité; hypothèses qui ne sont vraies ni l'une ni l'autre, mais d'où l'on déduit cependant quelques règles simples, qui sont très-utiles dans la pratique. Nous ne pouvons considérer ici que les corps sans élasticité, les singuliers phénomènes des corps élastiques devant être discutés en détail dans l'un des livres suivans.

1°. Quand deux masses égales, non élastiques, et animées de la même vitesse, viennent à se choquer *directement*, elles se pressent l'une l'autre, s'arrêtent tout à coup, et restent en repos dans le lieu même où le choc a eu lieu. C'est un principe évident de lui-même, car ces masses ne peuvent rejaillir, puisqu'elles manquent d'élasticité; et l'une ne peut entraîner l'autre et la pousser devant elle, puisque tout est égal dans les deux sens opposés. Ainsi, deux balles de plomb parfaitement égales, qui seraient lancées en même temps avec la même force, arrivant l'une contre l'autre avec la même vitesse, s'aplatiraient, parce qu'elles ne sont pas dures, et resteraient sans mouvement. Si elles tombent après le choc, ce n'est pas par un reste de vitesse qui n'aurait pas été détruit, mais bien par l'effet de la pesanteur qui agit sans cesse sur elles.

2°. Ce principe s'applique aux masses inégales, sous la seule condition que leurs quantités de mouvement soient égales entre elles, c'est-à-dire que, si l'une des masses est double de l'autre, il suffit que celle-ci ait une vitesse double pour être capable d'arrêter la première : une masse qui

serait cent fois plus petite devrait avoir une vitesse centuple pour produire le même effet, et ainsi de suite. Une balle de plomb d'une once arrêterait exactement un biscaïen d'une livre, si elle avait une vitesse seize fois plus grande que celle du biscaïen, et elle arrêterait un boulet de 48, si sa vitesse était sept cent soixante-huit fois plus grande que celle de ce boulet, puisqu'une once est la sept cent soixante-huitième partie de quarante-huit livres. Deux quantités de mouvement égales et contraires se détruisent exactement quand l'élasticité n'est pas en jeu, parce qu'en effet deux quantités de mouvement égales et contraires n'étant en réalité, comme nous l'avons vu, que deux forces égales et contraires, il faut bien qu'elles se détruisent.

3°. Quand les quantités de mouvement sont inégales, c'est la plus grande qui l'emporte; le mobile qui en est animé repousse devant lui l'autre mobile, il le force de rebrousser chemin, et à partir de cet instant ils se meuvent ensemble avec une vitesse qui leur est commune.

Alors la quantité de mouvement qui reste n'est que la différence des deux quantités de mouvement primitives; et comme elle est appliquée à la somme des deux masses, on voit que la vitesse restante n'est autre chose que cette différence des quantités de mouvement divisée par la somme de ces masses.

Si les mobiles allaient dans le même sens, les quantités de mouvement s'ajouteraient, et la vitesse commune, qui succéderait au choc, serait alors la somme des quantités de mouvement divisée par la somme des masses.

Ces conséquences s'appliquent au cas où un mobile rencontre un corps en repos; car pour avancer il est forcé de pousser devant lui ce corps en repos, et par conséquent de lui communiquer une telle quantité de mouvement qu'après le choc ils se meuvent ensemble d'une vitesse commune. Si la masse du corps en repos est égale à celle du mobile, il est clair qu'après le choc le mouvement sera également

partagé entre les deux masses, et la vitesse ne devra être que moitié, puisque la masse est devenue double; elle ne serait que le tiers de la vitesse primitive si la masse en repos était double de la masse du mobile; et l'on voit qu'en général, pour avoir le rapport de la vitesse qui a lieu après le choc à celle qui avait lieu avant le choc, il faut diviser la masse du mobile par la somme des masses du mobile et du corps en repos. Ainsi, une balle d'infanterie pesant $\frac{1}{20}$ de livre, et sa vitesse au sortir du canon étant de 1300 pieds par seconde, on voit que, si elle vient frapper un boulet de 48 qui soit en repos, elle le pousse devant elle; et leur vitesse commune est à la vitesse de 1300 pieds comme $\frac{1}{20}$ est à $48 + \frac{1}{20}$, ou comme 1 est à 961, c'est-à-dire qu'elle est $\frac{1300}{961}$, ou à peu près de 1 pied et $\frac{1}{3}$ par seconde.

Quand une balle vient frapper un grand bloc de pierre ou une montagne, elle doit aussi lui imprimer une certaine vitesse; seulement cette vitesse est très-petite : car le bloc de pierre pesant seulement cinq cents livres, la vitesse, après le choc, serait à 1300 pieds comme $\frac{1}{20}$ est à $500 + \frac{1}{20}$, ou comme 1 : 10001, c'est-à-dire qu'elle ne serait guère de plus d'un pouce par seconde; mais la résistance et le frottement ont bientôt détruit ce mouvement, qui se communique de proche en proche à tous les corps voisins, et même à la masse entière de la terre.

Ainsi, le mouvement se communique et ne se perd jamais : quand il semble s'éteindre, c'est qu'en réalité il sort du mobile pour passer dans les corps qui se trouvent sur son chemin; il se répand de proche en proche dans tous les corps qui sont contigus à ceux-ci, et il y devient insensible par la grande diffusion qu'il y éprouve. Il faut du mouvement pour détruire le mouvement; les résistances et les frottemens le dispersent et ne le détruisent jamais.

C'est d'après ces données que l'on mesure la vitesse des projectiles. On forme une espèce de pendule qu'on appelle *pendule balistique*, et qui se compose d'une grande masse de

bois ou de métal suspendue par une barre de fer (*Fig.* 26). La suspension de ce pendule pesant est ajustée pour qu'il oscille avec aussi peu de frottement qu'il est possible. On tire contre cette masse; le projectile y pénètre à une certaine profondeur, et partage avec elle tout le mouvement qui l'anime. La masse est poussée d'une certaine quantité, d'après laquelle on juge de la vitesse qu'elle a reçue; cette vitesse, multipliée par la somme des masses, donne la quantité de mouvement qui a lieu après le choc, et par conséquent celle qui avait lieu auparavant; il suffit donc de la diviser par le poids du mobile pour avoir la vitesse que possédait ce mobile au moment où il est venu frapper le pendule.

Il se présente dans la communication du mouvement des phénomènes singuliers qui dépendent de l'état d'agrégation des corps et de la rapidité avec laquelle le mouvement peut se transmettre de molécule en molécule dans l'intérieur d'une même masse. On sait, par exemple, qu'une balle traverse un carreau de vitre sans le rompre, et qu'elle y fait seulement un trou, comme ferait un emporte-pièce dans une feuille de métal. Cet effet ne dépend que de la vitesse de la balle, et non pas de sa forme; car si on la jette avec la main, elle casse le carreau tout aussi bien que le casserait une pierre. Mais dès qu'elle s'avance avec la rapidité que lui donne la poudre, les molécules qu'elle touche sont enlevées si vivement qu'elles n'ont pas le temps de transmettre sur les côtés le mouvement qu'elles reçoivent : tout se passe alors dans le cercle que frappe la balle; et le carreau tout entier, ne fût-il soutenu que par un fil de soie, n'éprouverait pas le moindre ébranlement.

C'est par la même raison que l'on a vu souvent un boulet de canon couper en deux le fusil d'un fantassin sans que celui-ci ressentît la moindre pression, à peu près comme avec une baguette on coupe une tête de pavot sans faire fléchir la tige. Pareillement on croyait que la bombe pourrait emporter avec elle une corde très-souple et très-tenace,

qui n'aurait qu'à se dérouler pour suivre le mouvement, et que de cette manière on pourrait sans danger porter un prompt secours à une grande distance, soit dans les naufrages ou les incendies, soit dans d'autres pressantes détresses; mais à l'expérience on n'a pu réaliser cet ingénieux projet; la corde casse, et ne suit point la bombe. Il faudrait un projectile dont la vitesse s'accrût assez lentement pour que l'adhésion des molécules pût résister aux secousses; car nous devons considérer la force d'adhésion, qui unit les molécules des corps, comme une sorte de lien immatériel qui ne peut supporter qu'un certain effort sans se rompre. Une molécule étant tirée, et l'autre étant en repos, le lien se brise si elle est tirée trop vivement; et, dans un temps donné, il ne peut passer ainsi d'une molécule à l'autre qu'une quantité de mouvement donnée.

Le mouvement produit par une explosion, soit par celle de la poudre, soit par celle de l'air ou de la vapeur comprimés, est un mouvement qui se communique essentiellement dans tous les sens. Les parois du canon empêchent l'expansion latérale, et tout l'effet se porte dans le sens de la longueur; mais là il se produit également dans les deux directions contraires, c'est-à-dire en avant pour pousser le projectile, et en arrière pour repousser la culasse, le canon et toutes les pièces qui en dépendent. Ces deux quantités de mouvement, qui sont toujours opposées, sont aussi toujours égales; de là vient le *recul*, qui accompagne inévitablement le départ du projectile. Si le fusil n'est pas repoussé contre l'épaule avec toute la vitesse de la balle, et si le canon et ses affûts ne reculent pas aussi vite que part le boulet, c'est seulement parce que les projectiles ont beaucoup moins de masse que les armes qui servent à les lancer. Quand un chasseur tire un coup de fusil, son épaule éprouve la même pression que si une balle venant du dehors entrait dans le canon, et en frappait le fond avec toute la vitesse de la balle qui sort.

On conçoit qu'il suffit de connaître le poids de l'arme, le poids du projectile et la vitesse du recul, pour en déduire la vitesse du projectile à son départ. C'est une méthode qui a été employée avec succès par Robins. Une circonstance digne de remarque, et qui est une autre preuve de la lenteur avec laquelle le mouvement se répand dans toute l'étendue d'une masse considérable, c'est que le recul ne commence à être sensible que quand le boulet est sorti du canon. L'expérience en fut faite pour la première fois à La Rochelle vers 1667, par les ordres du cardinal de Richelieu. On avait suspendu un canon à l'extrémité d'un grand levier mobile, et le boulet qui en sortait venait frapper le but, comme si le canon n'avait pu faire son recul que dans la direction même du mouvement du projectile.

La résistance des milieux n'est qu'un effet de la communication du mouvement. Quand un corps se meut dans l'eau, il est forcé d'écarter la couche qu'il rencontre, et tout le mouvement qu'il lui donne est autant de mouvement qu'il perd; puis, à mesure qu'il avance, il rencontre d'autres couches en repos, les écarte pareillement, et perd ainsi de nouvelles quantités de mouvement. Il en est de même pour tout autre milieu, tel que celui de l'air, d'un gaz ou d'un fluide quelconque. On admet dans tous ces phénomènes un principe général, savoir : que la *résistance d'un milieu* est proportionnelle au *carré de la vitesse* du corps qui le traverse, et voici la raison que l'on en donne : Quand la vitesse devient double, le corps parcourt une fois autant d'espace dans le même temps, et de là résulte, 1°. qu'il rencontre une fois autant de molécules auxquelles il donne du mouvement, ce qui lui fait déjà une perte double; 2°. comme il va une fois plus vite, il donne à ces molécules une fois autant de vitesse, ce qui double encore sa perte et la rend ainsi quatre fois plus grande. Donc, quand la vitesse devient 2, la perte devient 4, qui est le

carré de deux. On voit de même qu'avec une vitesse triple il rencontre trois fois autant de molécules, auxquelles il donne trois fois plus de vitesse, ce qui fait une perte neuf fois plus grande; et ainsi de suite. Pour des vitesses égales dans des milieux différens, les pertes dépendant de la quantité de matière que contiennent ces milieux, sous un volume donné, et de l'adhérence ou de la viscosité plus ou moins grande qui existe entre les molécules.

31. *De la force centrifuge.* — Concevons une petite boule sans pesanteur attachée à l'extrémité d'un fil extensible CM (*Fig.* 27), et supposons qu'on lui donne une impulsion pour la faire tourner autour du point C, comme la pierre d'une fronde tourne autour de la main. Il est clair que la boule décrira un cercle entier, puis un autre cercle, et ainsi de suite indéfiniment; s'il n'y avait pas de résistance, ce serait un mouvement perpétuel, et perpétuellement uniforme. La vitesse de ce mouvement circulaire est égale à l'espace divisé par le temps, comme celle du mouvement rectiligne. En même temps le fil éprouve une tension, car si on le coupe à un instant donné, la boule ne se mouvra plus en cercle, comme elle faisait auparavant; mais elle ira droit devant elle, en suivant la tangente sur laquelle elle se trouve. C'est la cause de cette tension du fil qu'on appelle *force centrifuge*, parce qu'en effet c'est l'effort que fait la boule pour fuir le centre, ou, ce qui revient au même, c'est l'effort qu'il faut faire pour la retenir et l'empêcher de s'en éloigner.

Quand la pierre d'une fronde tourne lentement, la corde est peu tendue; quand elle tourne vite, la corde se tend davantage; ainsi la force centrifuge est dépendante de la vitesse de rotation, elle croît et décroît avec elle dans un certain rapport. On démontre en mécanique que dans des cercles inégaux, qui sont décrits dans le même temps, les forces centrifuges sont proportionnelles aux rayons. Par exemple, CAB (*Fig.* 27) étant une roue horizontale ou verticale qui tourne autour de l'axe C, la force centrifuge du

point B sera double de celle du point A, si CB est double de CA.

Pour des cercles égaux, décrits dans des temps différens, les forces centrifuges sont en raison inverse des carrés des temps.

Si le mouvement n'était pas circulaire, s'il suivait une autre courbe quelconque, il n'y en aurait pas moins une force centrifuge; mais alors elle serait évaluée d'une autre manière. Dans tout mouvement curviligne la force centrifuge existe, et il faut toujours, pour l'empêcher d'avoir son effet, ou un fil qui retienne le mobile, ou une résistance qui l'empêche de s'éloigner, ou enfin une force attractive, qui agisse sans cesse sur lui et qui le presse vers le centre de rotation, autant que la force centrifuge le pousse à s'en écarter.

32. *Mouvement uniformément accéléré.*—On appelle *mouvement varié*, en général, le mouvement rectiligne ou curviligne dans lequel la vitesse change à chaque instant. Le mouvement est dit *accéléré*, si la vitesse va en augmentant, et *retardé*, si elle va en diminuant. On conçoit qu'il y a une infinité de mouvemens variés, car la vitesse d'un mobile peut changer en plus ou en moins d'une infinité de manières différentes. En général, dans les mouvemens variés de la nature, elle change suivant des lois assez simples pour qu'on puisse analyser toutes les circonstances que présente le mobile, pendant des temps très-considérables.

33. Dans le mouvement varié la vitesse n'est pas le rapport de l'espace au temps, comme dans le mouvement uniforme. Concevons un mobile qui se meuve d'un mouvement accéléré ou retardé, d'une manière quelconque; puisque son mouvement n'est pas uniforme, c'est qu'à chaque instant il y a une force nouvelle qui vient troubler l'uniformité, qui vient agir dans le sens même du mouvement pour en augmenter la vitesse, ou en sens contraire pour la diminuer. C'est là la cause nécessaire de la variation. Réci-

proquement, si, à une époque quelconque du mouvement varié, aucune force nouvelle ne venait agir sur le mobile, il est clair que toute variation cesserait à l'instant, et que le mobile continuerait de se mouvoir en ligne droite et d'un mouvement uniforme. Or la vitesse de ce mouvement uniforme qui succéderait ainsi au mouvement varié, si aucune force nouvelle ne survenait pour soutenir la variation, est précisément ce que l'on nomme la vitesse du mouvement varié.

Le mouvement *uniformément accéléré* est une espèce particulière de mouvement varié, c'est celui dans lequel la vitesse croît proportionnellement au temps; on peut le définir aussi en disant qu'il est le mouvement produit par une force *accélératrice constante*, c'est-à-dire par une force qui agit toujours sur le mobile, et qui a toujours la même direction et la même grandeur; car on démontre en mécanique qu'il n'y a que les forces de cette nature qui puissent imprimer au mobile des vitesses qui deviennent doubles, triples ou quadruples, quand les temps écoulés sont doubles, triples ou quadruples.

34. Toutes les lois du mouvement uniformément accéléré sont comprises dans les deux formules suivantes :

$$v = gt$$
$$e = \frac{gt^2}{2},$$

dans lesquelles t est le temps qui s'est écoulé depuis le départ du mobile, g la vitesse qu'il a acquise après une unité de temps, v celle qu'il a acquise après le temps t, et e l'espace total qu'il a parcouru dans le même temps. De ces quatre choses, deux étant connues, on peut trouver les deux autres. Nous en verrons de très-utiles applications en traitant de la pesanteur.

FIN DES NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

LIVRE PREMIER.

DE LA PESANTEUR.

CHAPITRE PREMIER.

Des effets de la pesanteur et de sa direction.

35. Les corps tombent quand on les abandonne à eux-mêmes, et ils tombent jusqu'à ce qu'ils touchent la terre ou quelque autre corps qui les soutienne. Ce phénomène se produit à la surface du sol, comme on l'observe tous les jours; il se produit à de grandes hauteurs dans le ciel, comme on peut en juger par la grêle et la pluie qui tombent des nuages; et il se produit encore à de grandes profondeurs sous terre, comme on le voit dans les puits, dans les caves et dans les mines les plus profondes que l'on ait pu creuser : quand on voit des montagnes qui s'affaissent, c'est qu'elles manquent par leur base, qui sans doute est encore plus enfoncée que le fond des mines; elles *tombent* faute d'avoir un appui qui soit assez ferme pour les soutenir. Cependant la matière étant inerte, et ne pouvant d'elle-même ni prendre du mouvement, ni changer celui qu'elle a, il est clair que d'elle-même elle ne pourrait descendre vers la terre, puisque ce serait se donner du mouvement; il faut donc qu'il y ait une force qui la fasse tomber, et c'est cette force qu'on appelle *pesanteur*.

Ainsi la *pesanteur* est la force qui fait *tomber* les corps. Mais cette définition donnerait de la pesanteur une idée tout-à-fait incomplète, si l'on supposait qu'elle ne pût produire d'autre effet que faire *tomber* les corps. Il faut s'attendre à voir cette force produire encore beaucoup d'autres phéno-

mènes et beaucoup d'autres mouvemens qui sont désignés dans le langage usuel par des mots très-différens. Tels sont, par exemple, les mouvemens des liquides qui s'écoulent des vases, et le mouvement des fleuves qui coulent vers la mer; tels sont les mouvemens du liége et des corps légers qui s'élèvent du fond de l'eau à sa surface; tels sont encore les mouvemens de la fumée, des brouillards et des ballons qui s'élèvent dans les airs. Tous ces phénomènes, qui semblent si contradictoires, ne sont que des effets variés de la même force, que nous venons d'appeler pesanteur.

Pour embrasser dans toute son étendue l'étude d'une force aussi féconde en résultats, nous aurons donc à rechercher tous les phénomènes différens qu'elle peut produire, et à déterminer ensuite les lois des actions qu'elle exerce, suivant les lieux qu'occupent les corps, suivant les arrangemens de leurs parties, et l'espèce de matière qui les compose.

Nous voyons d'abord que la pesanteur agit sur presque tous les corps qui se présentent à nos observations, mais qu'elle agit sur eux pour les faire tomber avec des vitesses très-différentes. Les pierres et les métaux tombent très-vite, le bois et les autres substances végétales tombent plus lentement, et il existe des corps, comme les plumes, les duvets et les flocons de neige, qui semblent à peine pesans, car ils flottent dans les airs, et ne tombent qu'avec une grande lenteur. Il résulte déjà de ce premier aperçu que, si la pesanteur n'est pas une force universelle, c'est au moins une force très-générale; car il n'y a qu'un petit nombre de corps, comme la flamme et la fumée, qui semblent se soustraire à son action. C'est là du moins ce qui arrive en nos climats, et ce dont nous sommes témoins dès les premiers jours de notre enfance; mais la terre est si grande qu'il est curieux de savoir ce qui se passe en d'autres lieux, sur les mers éloignées, sur les îles ou sur les continens qui n'ont plus ni les mêmes saisons, ni la même posi-

tion par rapport à l'axe du monde. C'était aux voyageurs à nous l'apprendre, et les voyageurs nous assurent que, si d'un pays à l'autre on voit changer les hommes, l'aspect du ciel et les productions du sol, il y a toujours une chose qui, au milieu de tant de variations, n'éprouve point de changement; c'est la force de la pesanteur: partout elle agit de la même manière, soit au milieu des mers ou des continens, soit dans les régions des pôles ou dans celles de l'équateur. Que s'il se trouve quelques légères différences, elles ne sont pas sensibles dans les phénomènes ordinaires; et il est vrai de dire que non-seulement la pesanteur agit sur presque tous les corps, mais encore qu'elle agit à peu près de la même manière dans tout le vaste contour du globe de la terre.

36. *Direction de la Pesanteur.* —Pour déterminer la ligne suivant laquelle tombent les corps, on pourrait les suivre de l'œil et approcher une règle droite dont ils dussent raser le bord; mais il y a un meilleur moyen, qui est de fixer un fil par un bout et d'attacher à l'autre bout une petite balle un peu pesante. La direction du fil, quand il sera tendu et en repos, sera précisément la direction de la pesanteur; car si cette force agissait suivant une autre ligne, elle tirerait le fil et l'entraînerait suivant cette autre ligne. Ce petit instrument s'appelle un *fil à plomb* ou un *pendule*, et sa ligne de repos s'appelle *la verticale* (*Fig.* 29); ainsi la direction de la pesanteur est celle du fil à plomb ou de la verticale, et rien n'est plus facile que de la trouver à chaque instant dans tous les lieux de la terre.

Supposons qu'après avoir fait cette expérience hier, nous la recommençons aujourd'hui; nous serons fort embarrassés de savoir si le fil à plomb n'a pas changé dans l'intervalle. Il faudrait avoir quelques points fixes, où l'on pût rapporter ses directions, pour les comparer ensuite. Un édifice très-solide n'a pas assez de stabilité pour cet objet; car si après un certain temps, nous trouvions que le fil à

plomb n'est plus à la même ligne par rapport à ses murs ou à ses arêtes, nous serions encore très-embarrassés pour une conclusion; nous saurions bien que quelque chose est changé, mais nous ne saurions pas si c'est dans la direction de la pesanteur ou dans la stabilité de l'édifice. Les flancs ou les arêtes d'une montagne ne seraient pas des marques moins incertaines : car, sur la terre, une montagne aussi est une chose instable; il faut moins qu'un tremblement de terre pour l'ébranler sur sa base. Ainsi tout est mobile autour de nous, et nous n'avons pas un point fixe, ni sur les continens, ni sur les montagnes, pour juger si la pesanteur est constante ou si elle change à mesure que les siècles s'écoulent.

Heureusement nous avons un autre moyen : la surface de la mer, toute mobile qu'elle est, nous offre dans sa direction générale et dans ses limites, la plus grande stabilité que nous puissions observer sur la terre : car un changement de niveau, même très-petit, amenerait de grandes inondations et peut-être un déluge; or il arrive, non pas fortuitement, mais par une raison que nous verrons plus tard en hydrostatique, il arrive que la direction de la pesanteur est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles; donc si la pesanteur changeait, la mer changerait, et c'est par là seulement qu'on peut juger de la fixité de sa direction.

Au lieu de dire que la pesanteur est perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles, on dit quelquefois qu'elle est perpendiculaire a la surface de la terre; et voici alors ce qu'on entend par la surface de la terre. Ce n'est pas, comme on le suppose bien, la surface apparente avec ses montagnes et ses vallées, mais c'est une surface idéale que l'on conçoit de la manière suivante : supposons que l'Océan atlantique, la mer du Sud et toutes les mers qui communiquent entre elles soient tranquilles pour un moment, leur immense plage formera une portion de surface à peu près sphérique, dont le contour sera déterminé par les sinuosités des rivages. Imaginons maintenant que les diverses parties de cette surface se pro-

longent en conservant leur courbure et en pénétrant sous les terres, et qu'elles se rejoignent de toutes parts au dessous des continens; elles formeront alors un globe complet parfaitement uni, n'ayant ni montagnes ni vallées. C'est cette surface, réelle en partie, et en partie idéale, qu'on appelle *surface de la terre*, *surface de niveau*, *surface horizontale*, car toutes ces expressions sont synonymes. Quand on dit que l'Observatoire de Paris est à 65 mètres au dessus de la surface de la mer, c'est comme si l'on disait que cette surface prolongée passe sous le premier étage de l'Observatoire, à une profondeur verticale de 65 mètres. Au contraire, il y a des plaines en Hollande qui sont au dessous de la mer, c'est-à-dire que la surface prolongée passe sur la tête des habitans.

La *surface de la terre*, telle que nous venons de la définir, pourrait, avec le temps, s'élever ou s'abaisser, s'éloigner ou se rapprocher du centre; mais si par quelque cause intérieure ou extérieure elle pouvait perdre sa forme, à l'instant la terre changerait son mouvement diurne, elle sortirait de l'orbite qu'elle parcourt depuis tant de siècles, et serait peut-être poussée dans quelque autre coin de l'univers. C'est ainsi que de la stabilité de la surface des eaux dépend de la stabilité de la terre et du monde.

La surface d'un lac, soit dans les plaines, soit dans les montagnes, est aussi une surface de niveau, c'est-à-dire que, si de ses rivages on abaissait des perpendiculaires sur la surface que nous venons de définir, elles y détermineraient une portion de surface qui serait semblable à celle du lac, et dont tous les points en seraient à la même distance. Il en est de même pour les surfaces des eaux tranquilles, soit au fond des puits, soit dans des vases de grandes dimensions; toutes ces surfaces sont horizontales, et toutes perpendiculaires à la direction de la pesanteur.

Il résulte de ces vérités fondamentales que toutes les directions de la pesanteur concourent vers le centre de la

terre; car toutes les perpendiculaires à une surface rigoureusement sphérique concourent à son centre. Ainsi ABPDX (*Fig.* 30), représentant la section de la terre qui serait faite par le méridien de Paris, et AX étant l'axe de rotation, il arrive, par les distances en latitude, que Paris se trouve en P, son horizon suivant PH, et son fil à plomb suivant PC; que Dunkerque est en D à une distance de 2° 11′ 56″, la ligne horizontale de Dunkerque en DH′, et son fil à plomb suivant DC; enfin que Barcelonne est en B, à 7° 28′ 29″ plus au midi, l'horizontale de Barcelonne en BH″, et son fil à plomb en BC.

Un observateur qui serait assez loin de la terre pour voir en même temps le fil à plomb de Paris et celui de Barcelonne, verrait qu'en effet ils sont inclinés l'un à l'autre de 7° 28′ 29″, et pourrait en conclure qu'ils concourent vers le centre de la terre. Quand on fait des expériences dans une petite étendue, comme dans un appartement ou même dans une grande ville, les fils à plomb semblent tout-à-fait parallèles, parce que le centre de la terre, qui est le point où ils tendent, est à une distance, d'environ 1432 lieues de 2280 toises, ou de 1632 lieues de poste de 2000 toises; or, 100 toises, par exemple, étant à peu près la trente-millième partie de cette distance; deux fils à plomb qui sont à 100 toises, ne font en effet qu'un angle de 6″, 3. Mais, puisqu'il en est ainsi, on ne comprend pas d'abord comment on peut mesurer l'angle des verticales de deux points; car, si ces points sont très-près, l'angle est si petit qu'il échappe aux mesures; et, s'ils sont très-loin, on ne peut plus voir en même temps ni les deux verticales, ni l'angle qu'elles font entre elles; toute mesure paraît donc impossible, et serait impossible en effet, si nous n'avions pas dans le ciel des points d'observation qui servent à nous guider. Les étoiles sont comme des jalons pour les habitans de la terre: c'est en les observant que nous pouvons mesurer nos angles et tracer nos alignemens. La distance du soleil à la terre

est de 35 millions de lieues, celle de la terre aux étoiles est 400 ou 500 mille fois 35 millions de lieues; ainsi, en quelque point de son orbite que soit la terre, et en quelque point de la surface de la terre que soit un observateur, les rayons visuels dirigés sur la même étoile sont des lignes toujours parallèles.

D'après cela, quand une étoile passe au méridien, et qu'on l'observe au même instant à Dunkerque et à Paris, les deux rayons DE et PE (*Fig.* 31) sont parallèles, mais les deux angles qu'ils font avec les verticales sont inégaux, et l'angle de Paris EPV est justement égal à l'angle de Dunkerque EDV′, plus à l'angle PCD des deux verticales, qui est par conséquent la distance angulaire de Dunkerque à Paris.

Voilà donc comment se dirige la pesanteur tout autour de la terre, et voilà comment il est possible de comparer sa direction dans les différens lieux. Il y a une conséquence qui se présente naturellement : c'est qu'après avoir observé l'angle des verticales de Dunkerque et de Paris, après l'avoir trouvé de 2° 11′ 56″, on peut mesurer en toises ou en mètres la distance de ces deux villes; et connaissant ainsi la longueur de cet arc de 2° 11′ 56″, on peut en conclure la longueur de la circonférence de la terre tout entière et ensuite la valeur de son rayon, comme nous le verrons dans un des chapitres suivans.

CHAPITRE II.

De la Chute des Corps et des Lois de la Pesanteur.

37. En observant les mouvemens de différens corps qui tombent, la première chose qui nous frappe est la grande inégalité de leurs vitesses. Une balle de plomb tombe très-vite et une feuille d'arbre très-lentement; c'est un phénomène que tout le monde connaît, mais qui ne résulte pas, comme on le dit communément, de ce que la balle est très-lourde et la feuille très-légère. Car une feuille d'or battu ou une feuille d'étain, quand elles sont bien étalées, tombent aussi très-lentement; tandis qu'elles tombent beaucoup plus vite si on les roule pour en faire de petites masses arrondies. Alors c'est le même poids, et on ne peut plus dire que c'est la différence des poids qui fait la différence des vitesses. Cette expérience est suffisante pour un observateur attentif : il en conclura bientôt que c'est l'air qui emporte les feuilles et qui les retarde dans leur chute, et que si l'air agit ainsi sur de grandes surfaces, il agit sans doute, quoique avec moins de force, sur des surfaces qui lui offrent moins de prise.

Pour trouver le vrai mouvement des corps pesans, il faudrait donc les faire tomber dans un lieu où il n'y eût point d'air, et par conséquent point de résistance qui pût combattre la pesanteur. Un espace où il n'y a ni air, ni liquide, ni autre matière résistante, est, comme nous l'avons vu (2), ce qu'on appelle le *vide*. Un tel espace n'existe pas naturellement; mais nous pouvons l'obtenir au moyen de la machine pneumatique : ainsi nous pouvons déterminer la véritable loi de la chute des corps.

On en fait l'expérience de la manière suivante : on prend un tube de verre de huit ou dix pieds de long, fermé par un bout, et muni à l'autre bout d'un robinet de forme ordinaire, capable de *tenir le vide*. Par l'ouverture du robinet, on fait passer dans le tube des morceaux de plomb, du papier, des plumes, ou tout autre corps sur lequel on veut faire l'expérience. On fait le vide avec beaucoup de soin, et on ferme le robinet. Alors, en tournant promptement le tube, pour le mettre dans la verticale, on voit tous ces corps qui tombent librement dans son intérieur et qui viennent tous au même instant en frapper le fond.

On peut modifier cette expérience de manière à rendre sensible le progrès du phénomène. On entr'ouvre un peu le robinet et on le ferme presque aussitôt; alors un peu d'air est rentré, car on en a entendu le sifflement; et en retournant le tube comme la première fois, on observe un peu de différence dans le temps de la chute, la plume et le papier sont en retard sur le plomb. Un peu plus d'air rend le retard un peu plus long, et ainsi progressivement : tant qu'à la fin, l'air étant complètement rentré, la chute se fait dans le tube comme elle se fait à l'air libre.

Ainsi, quand la pesanteur agit seule sur les corps, quand elle n'est combattue par aucune résistance qui gêne les mouvemens qu'elle leur imprime, elle agit sur tous également et avec la même énergie, quel que soit leur poids, et quelle que soit la substance qui les compose. Dans le vide, une masse d'or de cent livres ne tomberait pas plus vite qu'une parcelle d'or en feuilles, ni plus vite qu'un morceau de papier; une montagne ne tomberait pas plus vite qu'une plume.

38. Après avoir montré que, dans la réalité, tous les corps tombent avec la même vitesse, il faut chercher quelle est cette vitesse commune qui règle la chute de toute espèce de matière, et, en général, quel rapport il existe entre l'espace que parcourt un corps pesant et le

temps qu'il emploie à le parcourir. Ce rapport sera la loi de la pesanteur, c'est-à-dire la loi du mouvement que la pesanteur imprime à la matière.

Cette question semblerait assez facile à résoudre si l'on pouvait avoir un tube vide d'une centaine de pieds de longueur. Il suffirait de le placer verticalement, de laisser partir de son sommet un corps quelconque à un instant donné, et de marquer le point où il passe après une seconde, après deux secondes, etc. Mais on observerait bientôt ce que l'on peut observer aussi dans l'air, c'est qu'au commencement de leur chute les corps tombent très-lentement, puis leur vitesse augmente de plus en plus, et en peu d'instans elle est tellement accélérée qu'on ne pourrait plus noter le point où passe un corps, tant il passe rapidement. Une balle qui tombe d'un peu haut vient frapper la terre avec un mouvement très-vif, et une pierre qui tombe d'un édifice élevé prend assez de vitesse pour briser ce qu'elle rencontre ou pour se briser elle-même. Une chute aussi accélérée échappe à l'observation directe, et la loi de la pesanteur semble impossible à trouver; cependant on y parvient par quelques moyens ingénieux : par le plan incliné de Galilée, et mieux encore par la machine d'Atwood.

39. *Plan incliné de Galilée.* — Ce qu'on appelle plan incliné de Galilée n'est, à vrai dire, qu'une ligne inclinée, sur laquelle on fait rouler un mobile; c'est une corde très-unie, de vingt ou trente pieds de long, que l'on tend entre deux points fixes, dont l'un est plus bas que l'autre, et sur laquelle on fait rouler un petit char, ou plutôt une poulie de métal convenablement disposée. La pesanteur de la poulie serait complètement détruite si la corde était horizontale; elle aurait toute sa force, si elle était verticale; et, comme la corde a un certain degré d'inclinaison, la pesanteur de la poulie est réduite dans une certaine proportion facile à trouver par le calcul et qui est exprimée par sa valeur primitive multipliée par le sinus de l'inclinaison de la corde

sur l'horizon. Mais, quel que soit le rapport dans lequel on diminue une force, qu'on la réduise à la moitié, au tiers ou au quart de sa grandeur, on ne change que le mouvement absolu qu'elle imprime, sans rien changer au rapport des espaces parcourus dans des temps donnés. Ainsi, la loi que nous allons observer sur cette corde inclinée sera la vraie loi de la pesanteur. Or, si on laisse couler le char à un instant donné, qu'on note les espaces qu'il parcourt dans la première seconde, dans les deux premières secondes, etc., on trouve que ces espaces parcourus sont entre eux comme les carrés des temps employés à les parcourir. Donc le mouvement que la pesanteur imprime suit la même loi; c'est-à-dire que la pesanteur est une force accélératrice constante (34).

40. Cette vérité fondamentale, et tous les caractères des forces accélératrices constantes, se démontrent d'une manière plus claire et plus rigoureuse par la *machine d'Atwood*. Cet appareil est représenté (*fig.* 32). Mais pour la simplicité du raisonnement nous le réduirons à ses élémens essentiels, c'est-à-dire à une poulie parfaitement mobile, sur laquelle passe un fil très-fin, qui est tiré à chaque extrémité par le même poids m (*Fig.* 33). L'équilibre existe quand les deux poids sont au même niveau; et il existe encore, quand l'un est plus haut et l'autre plus bas, comme il est facile de le vérifier par l'expérience. Maintenant, ajoutons d'un côté une petite masse que nous représenterons par μ : il est clair que l'équilibre est troublé, que le poids μ entraîne le poids sur lequel il repose, et qu'il le force à descendre, tandis que l'autre, il le force à monter.

Mais quel est le mouvement qui en résulte ? est-il le même que si le poids μ tombait librement, ou bien est-il modifié par les poids opposés qui se meuvent avec lui ?

Les deux masses primitives n'ayant de mouvement que celui que leur donne la masse μ, il est évident que celle-ci

ne peut leur en donner qu'à ses dépens, qu'elle perd tout ce qu'elle donne, et qu'ainsi elle tombe moins vite qu'elle ne tomberait si elle était seule. De plus, il est facile de trouver de combien sa chute est ralentie.

Soit g la vitesse qui serait due à la pesanteur après une seconde de temps; la masse μ, si elle était libre, aurait donc au bout d'une seconde cette même vitesse g, et par conséquent une quantité de mouvement $g\mu$.

Soit x la vitesse inconnue que prennent en une seconde les masses m et μ en tombant ensemble; la quantité de mouvement du système sera $x(2m+\mu)$, puisque la masse qui se meut est d'une part m et de l'autre $m+\mu$, dont la somme fait $2m+\mu$. Or, dans une seconde, la masse μ reçoit de la pesanteur la même quantité de mouvement, soit qu'elle tombe d'une chute libre, soit qu'elle tombe d'une chute retardée par d'autres masses. Donc

$$x(2m+\mu)=g\mu, \text{ d'où } x=g.\frac{\mu}{2m+\mu}.$$

C'est, dans la machine d'Atwood, la vitesse du corps qui tombe. Elle est toujours plus petite que g, et peut en être une aussi petite fraction qu'on voudra. Si l'on veut, par exemple, qu'elle en soit un centième, il suffit de poser

$$\frac{\mu}{2m+\mu}=\frac{1}{100}, \text{ d'où } 100\mu=2m+\mu, \text{ et } \mu=\frac{m}{49,5};$$

c'est à-dire qu'à chaque instant la vitesse, dans la machine, d'Atwood, est la centième partie de la vitesse due à la chute libre, quand la masse additionnelle est la 49,5 partie d'une des masses primitives. En prenant, par exemple, $\mu=10^{gr.}$ et $m=495^{gr.}$, la condition sera remplie.

Il y a un grand avantage à réduire ainsi la vitesse des corps qui tombent, puisque alors les espaces parcourus peuvent être mesurés plus exactement, et la résistance de

l'air complètement négligée. Cette réduction de la vitesse est le vrai principe de la machine d'Atwood. Voici maintenant sa disposition :

1°. Pour éviter le frottement, on fait poser chaque extrémité de l'axe de la poulie sur deux autres poulies plus petites, dont les axes roulent sur des plans d'agate (*Figure* 34).

2°. Pour mesurer les espaces avec exactitude, on dispose près de la colonne une règle verticale et divisée, que la masse $m+\mu$ doit suivre dans sa chute, sans la toucher. Sur cette règle se meuvent deux curseurs : l'un A, en forme d'anneau, pour laisser passer la masse m et pour arrêter la masse μ, que l'on fait un peu plus longue ; l'autre C, en forme de plan, pour recevoir la masse m et l'arrêter où l'on veut.

3°. Pour compter le temps pendant lequel le mobile s'est mu, on adapte auprès de la machine une horloge à secondes, et on la fait communiquer à une détente particulière qui soutient la masse $m+\mu$ vis-à-vis le sommet de la règle, où se trouve le *zéro* de sa division. A un instant donné, la détente part, le poids tombe, et l'horloge continue de marquer le temps qui s'écoule.

On fait les expériences de la manière suivante : On place l'anneau de la règle à une hauteur telle, qu'il arrête la masse μ après une seconde de chute depuis l'instant du départ. Pour cela, on l'élève et on l'abaisse peu à peu, jusqu'à ce que le bruit de la masse μ, au moment où elle le frappe, coïncide juste avec le battement de l'horloge qui marque la fin de la seconde. Quant μ est arrêtée, tout le mouvement ne s'arrête pas; car les masses m ont une *vitesse acquise*, en vertu de laquelle elles continuent à se mouvoir ; seulement la pesanteur n'agit plus pour changer leur mouvement ; μ étant enlevée, la force accélératrice est enlevée, et le mouvement qui succède est un mouvement uniforme. Or, d'après ce que nous avons dit (33) la vitesse

de ce mouvement uniforme est précisément celle du mouvement accéléré qui avait lieu à la fin de la première seconde, et pour la trouver il suffit de placer le curseur C de telle sorte que m vienne le frapper juste une seconde après que μ est ôtée, c'est-à-dire deux secondes après le départ de μ. Alors la distance des deux curseurs A et C est l'espace que m a parcouru en une seconde en vertu du mouvement uniforme; c'est donc la vitesse de ce mouvement et aussi la vitesse du mouvement accéléré. On fait une deuxième expérience en n'ôtant la masse μ qu'après deux secondes; on en fait une troisième en ne l'ôtant qu'après trois secondes, et l'on a ainsi la vitesse du mouvement accéléré après une, deux, et trois secondes. On trouve exactement que ces vitesses sont entre elles comme 1, 2, 3; donc elles croissent proportionnellement au temps; donc le mouvement dont il s'agit est uniformément accéléré.

Ce résultat suffirait pour conclure que l'espace parcouru, en vertu du mouvement uniformément accéléré pendant un certain temps, est moitié de l'espace parcouru dans le même temps par le mouvement uniforme qui lui succède. Mais on le voit directement; car, dans chacune des expériences précédentes, la distance des curseurs est double de la distance de l'anneau au point de départ.

Pareillement on pourrait en conclure par le calcul que les espaces sont comme les carrés des temps; mais il est facile d'imaginer comment on peut le démontrer aussi par le moyen de la machine.

Ces expériences s'accordent avec celle de Galilée, pour prouver que la pesanteur, qui s'exerce à la surface de la terre, est une force accélératrice constante. Déjà la chute dans le vide a fait voir qu'elle s'exerce également sur toute espèce de corps. Ainsi, toutes les molécules matérielles, quelle que soit leur forme ou leur nature, sont constamment soumises à l'action de cette force.

D'après cela, les lois du mouvement qu'elle imprime sont

exprimées par les formules générales du mouvement uniformément accéléré (34),

$$v = gt$$

$$e = \frac{gt^2}{2},$$

dans lesquelles il reste à mettre pour g la valeur qui convient à la pesanteur. On se rappelle que g représente les vitesses que la force accélératrice imprime au mobile pendant l'unité de temps, et l'on se rappelle aussi que cette vitesse est double de l'espace que la force fait parcourir pendant la même unité; ainsi g est un espace ou une longueur. Nous indiquerons plus tard un moyen très-exact d'en trouver la mesure, et nous verrons qu'en prenant la seconde pour unité de temps, la valeur de g est à Paris

$$g = 9^m,8088.$$

Avec cette donnée on peut s'exercer à résoudre plusieurs problèmes sur le mouvement des corps pesans.

1°. Un corps tombe pendant cent secondes : quelle vitesse a-t-il à la fin de sa chute, et quel est l'espace qu'il parcourt ?

2°. Un corps a parcouru mille mètres dans sa chute : pendant combien de temps est-il tombé ?

3°. Quel est l'espace qu'un corps parcourt depuis la vingtième jusqu'à la trente-septième seconde de sa chute ?

4°. On donne au mobile une impulsion verticale de haut en bas, qui lui imprimerait un mouvement uniforme, dont la vitesse, exprimée en mètres, serait de a en une seconde; quel est l'espace qu'il parcourt en vertu de cette impulsion et de la force de la pesanteur ?

C'est un principe de mécanique, que, quand deux forces sollicitent un mobile dans le même sens, sa vitesse est la somme des vitesses, et l'espace qu'il parcourt la somme des espaces dus à chaque force.

Ainsi, après le temps t, sa vitesse sera $v = gt + a$ et l'espace $e = \frac{gt^2}{2} + at$.

5°. On donne au mobile une impulsion verticale de bas en haut, qui lui imprimerait un mouvement uniforme dont la vitesse serait de a mètres en une seconde; à quelle hauteur arrivera-t-il avant de s'arrêter, et quelle vitesse aura-t-il en revenant au point de départ?

Il résulte du principe précédent que les vitesses et les espaces se retranchent, quand les forces agissent en sens contraire. Ainsi les équations du mouvement sont ici :

$$v = a - gt$$
$$e = at - \frac{gt^2}{2}$$

gt va croissant avec le temps; ainsi la vitesse v décroît sans cesse, elle sera nulle quand on aura $a = gt$, ou quand il sera écoulé un temps égal à $\frac{a}{g}$. Alors l'espace parcouru sera, en mettant pour t cette valeur dans la seconde équation, $e = \frac{a^2}{g} - g\frac{a^2}{2g^2} = \frac{a^2}{g} - \frac{a^2}{2g} = \frac{a^2}{2g}$. C'est la hauteur que le mobile peut atteindre. Arrivé là, il retombe de sa chute naturelle avec des vitesses toujours croissantes. Revenu enfin au point de départ, il aura parcouru l'espace $\frac{a^2}{2g}$; ainsi il aura employé un temps donné par l'équation $\frac{a^2}{2g} = \frac{gt^2}{2}$, c'est-à-dire un temps $t = \frac{a}{g}$; c'est justement le temps qu'il avait mis à monter; il aura donc à cet instant une vitesse $v = g.\frac{a}{g}$, ou $v = a$; c'est la vitesse qu'il avait en partant.

Ainsi, un mobile pesant, lancé verticalement, ne met pas plus de temps à monter jusqu'au point où il s'arrête qu'il n'en met à redescendre naturellement de ce point au point de départ; et la vitesse qu'il acquiert en revenant est la même qu'il avait en allant.

CHAPITRE III.

Du Centre de Gravité. — De l'Équilibre des Solides. — De la Balance. — Du Poids, de la Masse, et de la Densité des Corps.

41. Un corps pesant, quelque grand ou quelque petit qu'il soit, peut être considéré comme un assemblage d'un nombre infini de points matériels, dont chacun est sollicité par la pesanteur.

Toutes ces forces, quoique en nombre infini, pourraient être remplacées par une force unique, appliquée en un certain point; c'est cette force, qui ne serait autre chose que la résultante de toutes les actions de la pesanteur, que l'on appelle *le poids* d'un corps, et c'est le point où elle devrait être appliquée qu'on appelle son *centre de gravite*.

Cette définition suffit pour qu'on ne confonde pas la *pesanteur* avec le *poids*, puisque la pesanteur est la force élémentaire qui sollicite chacune des parcelles de la matière en général, et que le poids d'un corps est la somme ou plutôt la résultante de toutes les actions que la pesanteur exerce sur ce corps en particulier.

Il est très-important de savoir déterminer le poids des corps et leur centre de gravité, puisque alors on pourra substituer le poids, qui est une seule force, à toutes les forces élémentaires qui agissent sur un corps, et le centre de gravité, qui est un seul point, à l'ensemble des points qui le constituent; et qu'ainsi une masse pesante, quelles que soient sa grandeur et sa forme, pourra être considérée comme un seul point sollicité par une seule force.

42. *Du Centre de Gravité.* — Dans un corps pesant, qui n'a pas quelques centaines de toises d'étendue, les actions

que la pesanteur exerce sur chaque molécule peuvent être prises pour parallèles, puisqu'elles vont concourir au centre de la terre, et elles sont toutes égales, puisque ces molécules tombent également vite dans le vide; ainsi le *centre de gravité* n'est autre chose qu'un *centre de forces parallèles et égales*. De là résulte une propriété caractérisque du centre de gravité, c'est que ce point est fixe dans l'intérieur des corps solides, et ne change pas, quelle que soit la position qu'on leur donne à l'égard de la pesanteur. Par exemple, le point G (*Fig.* 35) étant le centre de gravité du corps ABC quand le point C est en haut, il sera encore le lieu du centre de gravité quand le point C sera en bas, ou dans toute autre position qu'on pourrait lui donner; car le point d'application de la résultante des forces parallèles est indépendant de la direction de ces forces (21).

Pour qu'un corps pesant soit en équilibre, il n'y a qu'une seule condition essentielle à remplir; c'est que le centre de gravité soit soutenu. Par conséquent, si le centre de gravité est lui-même un point fixe, on pourra tourner le corps de toutes les manières possibles, il restera toujours en repos, parce qu'il sera toujours en équilibre. On en peut faire l'expérience avec une poulie homogène, tournant autour d'un axe horizontal, qui passe par le centre. Lorsqu'un corps est soutenu par un point fixe qui n'est pas le centre de gravité, l'équilibre est encore possible, mais il n'a plus lieu que dans deux positions seulement, savoir : quand le centre de gravité est dans la verticale du point fixe, soit au dessus, soit au dessous de ce point. On en peut faire l'expérience avec une poulie homogène tournant d'un axe horizontal et excentrique.

C'est de cette considération que l'on tire un moyen expérimental de trouver le centre de gravité d'un corps. On l'attache avec un fil en un point C de sa surface (*Fig.* 36), on le suspend, et, quand il est en repos, on marque avec autant d'exactitude qu'il est possible, le point *m* où le pro-

longement du fil viendrait percer la surface inférieur; le centre de gravité est nécessairement sur la ligne C*m*. Ensuite on recommence l'expérience en attachant le corps par un autre point A, et en marquant de même le point *m'* correspondant; le centre de gravité est aussi dans la ligne A*m'*. Donc il se trouve à la rencontre des deux lignes C*m* et A*m'*.

Pour des corps très-lourds, on pourrait faire l'expérience en sens contraire, en les tournant sur leurs arêtes ou en les posant sur des supports de petite étendue. Mais, pour les corps homogènes qui ont des formes régulières, on détermine leur centre de gravité par des considérations géométriques assez simples.

Ligne droite. —Le centre de gravité est évidemment au milieu de la longueur.

Cylindre à bases parallèles. —Le centre de gravité est dans l'axe, puisque c'est une ligne autour de laquelle tout est symétrique; il est aussi dans la section perpendiculaire qui couperait le cylindre en deux parties égales; donc il est au milieu de l'axe en G (*Fig.* 37). Il en est de même d'un cylindre creux (*Fig.* 38); et pour un cylindre en partie plein et en partie creux (*Fig.* 39), il n'est pas difficile de voir comment on le pourrait trouver.

Parallélogramme. —Le centre de gravité est à la rencontre des diagonales; car chaque diagonale coupe la figure en deux parties égales. Il en est de même pour un parallélogramme creux, comme un cadre.

Cercle. —Le centre de gravité est au centre du cercle, ce point est pareillement le centre de gravité de la circonférence et celui de l'anneau compris entre deux circonférences concentriques (*Fig.* 40).

Triangle. —On mène les lignes *de*, *fg*, etc., parallèlement à la base (*Fig.* 41), ensuite la ligne A*m* qui coupe en deux parties égales cette base et toutes ses parallèles; on achève les parallélogrammes *d*B*Ce*, *hbci*, etc., par des lignes parallèles à A*m*. La ligne A*m* passe par le centre de

gravité de tous les parallélogrammes extérieurs, et aussi par les centres de gravité de tous les parallélogrammes intérieurs au triangle; et elle y passe, quelle que soit la grandeur que l'on donne à ces parallélogrammes. Or, comme ils sont, les uns circonscrits au triangle, les autres inscrits, et comme à leur limite de petitesse ils finissent par se confondre avec lui, il faut bien aussi que le centre de gravité du triangle soit sur Am; pareillement il doit être sur Bm (*Fig.* 42.), donc il est en G à leur rencontre; et il résulte des triangles semblables ABG et mGm' que mG est la moitié de AG, ou que le point G est aux deux tiers de Am, à partir du point A.

Polygones. — On les décompose en triangles (*Fig.* 43), dont on cherche les centres de gravité; ensuite on regarde les forces appliquées aux centres de gravité des triangles comme étant proportionnelles à leurs surfaces, on en cherche la résultante par les règles ordinaires, et son point d'application est le centre de gravité.

Pyramide triangulaire. — On mène une ligne du sommet S (*Fig.* 44) au point G, centre de gravité de la base AAC; et on démontre aisément, en faisant des tranches inscrites et circonscrites, comme pour les triangles, que le centre de gravité est sur cette ligne SG; qu'il est pareillement sur SG', et qu'ainsi il est en G'' à leur rencontre. Ensuite on conclut, par la comparaison des triangles semblables, que ce point G'' est aux trois quarts de SG, à partir du sommet. Une pyramide quelconque se décompose en pyramides triangulaires, et on arrive à cette conséquence, que, dans tous les cas, le centre de gravité d'une pyramide est sur la ligne qui joint son sommet au centre de gravité de sa base, et qu'il est aux trois quarts de cette ligne, à partir du sommet.

Polyèdre. — On le décompose en pyramides, comme le polygone se décompose en triangles.

Cône. — C'est comme une pyramide.

Sphère. — Le centre de gravité est au centre de la sphère ; de même pour une surface sphérique ; de même pour une couche comprise entre deux sphères concentriques.

43. *De l'Equilibre.* — Nous avons déjà vu que la seule condition d'équilibre d'un corps pesant est que son centre de gravité soit soutenu ; mais cette condition se remplit de diverses manières, suivant que le corps est suspendu à des points fixes, ou posé sur des appuis.

Si l'aiguille AC (*Fig.* 45) pouvait se mouvoir librement autour de son axe sur le cadran vertical MTSN, il faudrait, pour que son centre de gravité G fût soutenu, qu'il se trouvât dans le plan vertical passant par l'axe. Il n'y peut être que de deux manières, ou en G′ au dessous de l'axe, ou en G au dessus ; ce qui ne donne que deux positions d'équilibre. Dans le premier cas, on dit que l'équilibre est *stable*, parce qu'en écartant l'aiguille d'un côté ou de l'autre de sa position, elle tend à y revenir et finit par la reprendre. Au contraire, dans le second cas, on dit que l'équilibre est *instable ;* parce que l'aiguille, pour peu qu'elle en fût écartée, ferait la bascule, et n'y reviendrait jamais. Ce résultat est général ; il y a toujours *stabilité*, quand le centre de gravité est *au dessous* de l'axe, et *instabilité*, quand il est *au dessus*. Entre ces deux positions il n'y point d'équilibre possible, et si l'aiguille est retenue par son frottement contre l'axe, alors c'est l'axe lui-même qui est entraîné, comme il arrive dans les horloges, et qui l'est d'autant plus que le centre de gravité est plus loin de la verticale. Ainsi avec une aiguille un peu pesante, dont le centre de gravité serait loin de l'axe, une horloge devrait avancer de midi à six heures et retarder de six heures à midi.

Un corps qui est posé sur un plan horizontal et qui ne le touche que par un point, peut prendre aussi diverses positions d'équilibre : les unes sont stables, et les autres instables, comme dans l'exemple précédent : et il y en a d'autres

enfin qu'on appelle *indifférentes*, parce que le corps, quand on l'en écarte un peu, ne fait aucun effort pour y revenir, ni pour s'en écarter davantage; il reste dans la position qu'on lui donne. Si du centre de gravité d'un corps on mène des rayons à tous les points de sa surface, la plupart de ces rayons sont obliques à cette surface, au point où ils aboutissent; mais il y en a toujours un certain nombre qui lui sont perpendiculaires, et cela, quelle que soit la forme extérieure du corps; en effet, il y a toujours un rayon *maximum* entre tous, ou *maximum absolu*, et un rayon *minimum absolu*, en général; il y a même d'autres rayons qui sont maximum ou minimum entre leurs voisins, et tous ces rayons sont essentiellement des normales à la surface, puisqu'ils coïncident avec les rayons des sphères osculatrices. Or il est évident que, si le corps touche le plan horizontal par l'extrémité d'un de ces rayons normaux, le centre de gravité est dans la verticale du point de contact, et l'équilibre existe. Au contraire, si le corps touche le plan par l'extrémité d'un rayon oblique, le centre de gravité n'est plus soutenu, puisqu'il n'est plus dans la verticale du point de contact.

Si le rayon normal du point de contact n'est ni maximum ni minimum, mais seulement égal à ses voisins, l'équilibre n'est ni stable ni instable, il est indifférent. C'est ce qui arrive à une sphère homogène posée sur un plan horizontal; elle est en équilibre dans toutes les positions, et par conséquent en équilibre indifférent. Si le rayon normal du point de contact est maximum, l'équilibre est instable; c'est le cas d'un œuf posé sur sa pointe, ou d'un ellipsoïde posé sur l'extrémité de son grand axe. Si le rayon normal du point de contact est le rayon minimum absolu, l'équilibre est stable, et a la plus grande stabilité qu'il puisse prendre; c'est le cas d'un ellipsoïde de révolution autour de son petit axe, et posé sur l'extrémité même de ce petit axe. Enfin, si le rayon normal du point de con-

tact est seulement minimum entre ses voisins, l'équilibre ne sera stable que dans l'étendue des points pour lesquels le minimum a lieu; et si le rayon est, dans un sens, égal à ses voisins, tandis qu'il est dans les autres sens un maximum ou un minimum, l'équilibre est indifférent dans le premier sens, et stable ou instable dans les autres sens. C'est le cas d'un œuf posé par le côté, ou d'un ellipsoïde de révolution autour du petit axe ou du grand axe. On peut facilement imaginer diverses expériences qui rendent ces considérations plus familières.

Quand un corps est posé sur un plan par deux points, il faut que la verticale abaissée du centre de gravité tombe sur la ligne qui joint ces points, et dans l'intervalle qui est compris entre eux. Ainsi dans les voitures à deux roues, la verticale du centre de gravité doit tomber entre les roues et sur la ligne qui joint leur point de contact avec le sol. Si elle tombe en avant ou en arrière, la voiture est trop chargée de l'avant ou de l'arrière; et, comme ces voitures peuvent rouler sur des plans inclinés, où elles sont retenues par le frottement, il faut, pour qu'elles ne versent pas, que la verticale du centre de gravité ne tombe pas hors de la ligne du point de contact des roues; ce qui est d'autant plus difficile, que les roues sont plus élevées, et que la charge occupe un plus grand volume.

Quand un corps est posé sur une base plus ou moins étendue, l'équilibre n'a lieu que quand la verticale du centre de gravité tombe dans l'enceinte de la base. On conçoit qu'il importe peu que cette base soit ou ne soit pas continue; quand elle ne l'est pas, on achève son enceinte en menant des tangentes aux points extrêmes (*Fig.* 46). Plus l'enceinte a d'étendue, et plus le centre de gravité peut être déplacé, sans que le corps cesse d'être soutenu.

Tous les jeux d'équilibre dont on amuse les curieux roulent sur la dextérité avec laquelle on maintient la verticale du centre de gravité sur une base très-étroite. Tantôt la base

est fixe, et n'a d'étendue que quelques pouces de la longueur d'une corde assez mince, et alors il faut faire jouer le balancier pour ramener dans cet espace la verticale du centre de gravité; tantôt cette base est mobile, et il faut la faire mouvoir assez adroitement pour qu'elle se trouve sans cesse sous le centre de gravité, comme dans l'équilibre d'une canne ou d'une épée qu'on soutient sur la pointe du doigt; tantôt les deux difficultés se rencontrent à la fois, et c'est alors que le danseur de corde montre tout son talent. Mais les applications véritablement utiles des conditions de l'équilibre sont celles qui se présentent à chaque instant dans les arts. Ceux qui ne les observent pas soigneusement dans le dessin, par exemple, et dans la sculpture, sont exposés à faire des figures qui tombent, ou des statues qui ont besoin des broches qui les traversent pour se tenir debout.

44. Les conditions d'équilibre, telles qu'on les donne habituellement et telles que nous venons de les établir, ne sont réellement suffisantes que dans les spéculations de la théorie, car elles supposent à la matière une propriété dont elle ne jouit pas; elles supposent que tous les corps sont parfaitement rigides, c'est-à-dire qu'ils ne sont ni élastiques, ni compressibles, et que leurs molécules ont à l'égard l'une de l'autre une immobilité absolue. En effet, concevons une barre de fer d'un pouce carré de section et parfaitement homogène, qui soit posée par son milieu sur un appui quelconque (*Fig.* 47); son centre de gravité sera soutenu, et cependant l'équilibre n'aura pas lieu, car elle fléchira en vertu de son élasticité, et si elle est assez longue, elle pourra fléchir au point de se rompre. Il en est de même dans tous les cas que la nature nous présente; partout il faut tenir compte de l'élasticité de la matière et de sa ténacité. Ce qui est vrai du fer et des corps inorganiques l'est à plus forte raison des corps organisés, qui sont bien moins tenaces et bien plus élastiques. Un arbre est soutenu, parce que la verticale de son centre de gravité tombe dans

la vaste enceinte qui est déterminée par les racines; mais cela n'empêche pas que les rameaux ne fléchissent par leur propre pesanteur, et que la tige elle-même ne puisse fléchir et se rompre par la même cause. Un éléphant est soutenu, parce que la verticale de son centre de gravité tombe dans l'enceinte des quatre colonnes qui supportent sa masse; mais il faut, en outre, que les vertèbres et les côtes soient assez fortement articulées pour porter un tel poids, et que les muscles et la peau puissent résister à la pression qu'ils en éprouvent.

On comprend pareillement que les changemens de forme qui résultent, soit de l'élasticité, soit de la compressibilité, soit des mouvemens volontaires qui déplacent les membres et les organes, sont autant de causes qui font varier le centre de gravité. Quand un homme lève le bras, son centre de gravité change de place; quand un oiseau allonge le cou, son centre de gravité est très-sensiblement porté en avant. On voit (*Fig.* 48) les quatre positions du centre de gravité d'un oiseau dans les quatre situations principales de la marche, du repos, de la nage et du vol.

45. *De la Balance.* — La balance se compose essentiellement d'un fléau A *m* B (*Fig.* 49), dont les deux parties *m* A et *m* B s'appellent les bras de la balance, et de deux pièces mobiles adaptées aux extrémités du fléau que l'on appelle les plateaux ou les bassins. Le fléau est soutenu vers son milieu sur un pied solide, et il porte une longue aiguille perpendiculaire qui tombe au *zéro* de sa division quand le fléau est horizontal, et qui passe à gauche ou à droite, suivant que le fléau se relève lui-même à gauche ou à droite. On met dans l'un des bassins le corps que l'on veut peser, et dans l'autre des poids marqués; on en met jusqu'à ce que le fléau soit horizontal, ou du moins jusqu'à ce que l'aiguille fasse des oscillations égales de part et d'autre de son zéro. Alors la somme des poids est prise pour le poids du corps. C'est ainsi que l'on pèse ordinairement

quand on n'a besoin d'aucune exactitude, et quand on veut être à peu près sûr de se tromper; mais ce n'est pas ainsi que l'on pèse en physique et en chimie. Il faut deux choses pour arriver à quelque exactitude; il faut une grande perfection dans la balance et une grande habileté à s'en servir.

Pour qu'une balance soit bonne, il faut : 1° que le fléau n'éprouve sur ses supports que le moindre frottement possible, et cette condition se remplit de la manière suivante : CC est un prisme d'acier qui traverse le fléau F, comme on le voit (*Fig.* 50), et qui est taillé, comme on le voit, par sa section perpendiculaire, qui est représentée en S. L'arête *a* est un tranchant un peu arrondi, et c'est ce tranchant, qu'on appelle le couteau, qui porte toute la masse du fléau, de l'aiguille, des bassins et des poids qu'ils contiennent : car il repose sur deux pièces d'agate ou d'acier PP qui sont incrustées dans le pied de la balance, de manière que leurs surfaces ne forment qu'un même plan horizontal.

2°. Il faut que la distance du point d'attache des bassins au point de suspension du fléau soit très-exactement la même dans toutes les positions que prend l'appareil avant de s'arrêter à l'équilibre; car si ces distances pouvaient changer, les poids qui sont dans les bassins agiraient par des leviers variables, et produiraient des différences dont on ne pourrait plus tenir compte (*Fig.* 49) : ce serait comme si on suspendait le fléau tantôt par un point, tantôt par un autre, ou comme si on attachait les bassins tantôt à une moindre, tantôt à une plus grande distance du centre. On remplit cette condition en ajustant les pièces, pour que les bassins ne touchent le fléau que comme le fléau lui-même touche ses appuis, c'est-à-dire par des arêtes légèrement arrondies, très-dures et très-polies (*Fig.* 51). *f* représente l'extrémité du fléau; *cc* est un petit prisme d'acier dont l'arête tranchante est en haut, comme on le voit par la section *s*, et *hh* sont deux crochets dont les courbures *rr* sont aussi tail-

lées en couteau, pour qu'en se posant sur l'arête *cc* il n'y ait qu'un point de contact de chaque côté, et que ce point reste le même dans toutes les oscillations du fléau.

3°. Il faut que le centre de gravité du fléau soit convenablement placé pour que l'équilibre soit stable, et pour que les oscillations ne soient ni trop lentes ni trop rapides. Si le centre de gravité était en G (*Fig.* 52) au dessus de l'axe de suspension, l'équilibre serait instable, et la balance serait folle. S'il était en G (*Fig.* 53) sur l'axe de suspension lui-même, l'équilibre serait indifférent, et la balance n'oscillerait pas. Dans une position inclinée, le fléau serait aussi bien en équilibre que dans la position verticale. Enfin, si le centre de gravité est en G (*Fig.* 54) au dessous de l'axe de suspension, l'équilibre est stable, d'après ce que nous avons vu (34). Quand le fléau penche à droite, le centre de gravité sort à gauche de la verticale du point de suspension; il tend à y revenir, et y revient en effet par une suite d'oscillations dont la rapidité est plus ou moins grande.

4°. Pour que le couteau ne fatigue pas les plans sur lesquels il repose, il y a deux fourchettes qui montent et qui descendent pour le soulever ou pour le mettre en place. Quand on ne se sert pas de la balance, on lève les fourchettes par un mouvement de manivelle (*Fig.* 55), et le fléau repose sur elles; quand on veut s'en servir, on abaisse doucement les fourchettes, et le couteau vient reposer sur ses plans. Ce mécanisme sert aussi dans chaque pesée pour arrêter les oscillations du fléau.

On pourrait bien demander, pour dernière condition d'exactitude, qu'il y eût une égalité parfaite entre les deux bras de la balance, c'est-à-dire entre la distance du couteau central aux deux couteaux extrêmes qui portent les bassins; mais il est très-difficile que cette condition soit remplie, et le plus sûr est de supposer qu'elle ne l'est pas. Borda nous a dispensé d'exiger des artistes ce dernier degré de perfection, en imaginant une méthode ingénieuse qu'on appelle

la méthode des doubles pesées. On met dans un des bassins le corps qu'on veut peser; dans l'autre, on met des poids non marqués, comme de la grenaille de plomb et des fragmens de clinquant, pour compléter l'équilibre; alors on lève les fourchettes, on ôte le corps, ou tout à la fois, ou par partie, et à sa place on met des poids marqués jusqu'à rétablir l'équilibre exactement : la somme de ces poids est le vrai poids du corps, puisqu'ils produisent le même effet que lui pour équilibrer ce qui est dans l'autre bassin. Avec de bonnes balances, telles que celles de M. Fortin, il ne faudra plus pour peser exactement qu'une dextérité qui s'acquiert par l'habitude. Les balances construites pour peser jusqu'à un kilogramme trébuchent à un milligramme. Un milligramme n'est qu'une parcelle de métal; mais c'est cependant un poids assez sensible; c'est plus que le poids d'une mouche. Les balances qui ne sont faites que pour aller à quelques grammes sont beaucoup plus délicates, et trébuchent aux fractions de milligrammes.

45. *Du Poids, de la Masse, et de la Densité.* — Il importe, pour les relations civiles et commerciales, que les poids marqués dont on se sert soient partout les mêmes, ou du moins qu'ils aient partout un rapport connu et invariable avec un poids déterminé pris pour unité. Il importe pour la science que l'unité de poids ne puisse pas se perdre, et que l'on puisse dans tous les temps en vérifier l'exactitude, pour comparer les résultats d'une époque à ceux d'une autre époque, et en déduire des connaissances nécessaires sur les lois de la pesanteur et des conséquences utiles pour les recherches statistiques.

L'unité de poids, qui a été adoptée en France dans ces derniers temps, est le *gramme*, qui est le poids d'un centimètre cube d'eau distillée prise au maximum de condensation. Si la longueur du centimètre se perdait, on pourrait la retrouver, puisqu'elle est la centième partie du mètre; et si le mètre lui-même venait à se perdre, on pourrait le

retrouver aussi, puisqu'il est la dix-millionième partie de l'arc du méridien de Paris, compris entre le pôle et l'équateur; il suffirait de recommencer la mesure de la terre. Enfin, si la terre elle-même venait à changer de forme ou de grandeur, alors le mètre serait changé; on ne pourrait plus en retrouver la longueur : mais en même temps tout serait changé pour nous; les jours et les nuits n'auraient plus les mêmes périodes, ni les saisons le même cours et la même durée; l'unité de poids serait elle-même altérée : et elle le serait encore si l'eau pouvait changer de composition, ou si la pesanteur pouvait changer d'action. Ainsi, tout est conditionnel dans nos principes les plus fondamentaux, et la science a fait tout ce qu'elle pouvait faire quand elle a établi ses bases sur la stabilité du monde.

On dit communément que la *masse* d'un corps est la quantité de matière qui le compose; mais cette définition serait tout-à-fait illusoire, si nous n'avions pas quelque moyen de comparer les quantités de matière et d'établir leur rapport. Nous savons bien que dans l'espace d'un pied cube nous pouvons faire entrer des quantités de fer très-différentes; car le fer peut se comprimer, s'écrouir, et se réduire à un moindre volume. Il en est de même de tous les corps, et surtout de l'air. Tout le monde sait que dans l'espace d'un pied cube on en peut faire entrer des quantités très-différentes, suivant le degré de compression qu'on lui donne. Il est probable que tout l'air d'un appartement pourrait entrer dans un fusil à vent, si le réservoir était assez fort pour résister à la pression. Ainsi, la quantité de matière n'est pas proportionnelle au volume.

C'est en vain que l'on chercherait quelque autre caractère extérieur pour juger de la quantité de matière qui est contenue dans un espace donné; on n'y arriverait jamais, s'il n'y avait dans la nature quelque force particulière qui remplît les conditions suivantes : 1° qui sollicitât également tous les atomes des corps, et 2° qui fût telle que l'on pût

en obtenir la résultante. Or la pesanteur est une force de cette espèce; elle agit également sur toutes les substances, puisque toutes, dans leur chute, prennent la même vitesse, et on peut connaître sa résultante sur un corps donné, puisque cette résultante est le poids du corps. C'est d'après cette vérité d'expérience qu'il est permis de conclure que *la masse ou la quantité de matière est proportionnelle au poids.* Sur quoi il faut remarquer qu'il y a deux manières d'évaluer le poids d'un corps. On peut l'évaluer au moyen de la balance, comme nous venons de l'indiquer; alors le poids est indépendant de l'intensité de la pesanteur. Par exemple, si une balance est en équilibre à Paris, ayant une certaine quantité de fer dans un de ses plateaux et dans l'autre des poids de cuivre, de la valeur d'un kilogramme, elle serait encore en équilible au sommet des Alpes, quoique au sommet des Alpes la pesanteur fût moindre qu'à Paris. Cela est ainsi, parce que le fer, le cuivre et toutes les substances gagnent du poids ou en perdent dans le même rapport, quand la pesanteur augmente ou quand elle diminue; la même balance serait encore en équilibre si on la portait aux limites de l'atmosphère, ou à la surface de la lune, ou même jusqu'à la surface du soleil. Au contraire, si l'on voulait évaluer les poids au moyen d'un ressort gradué qui fléchît d'une certaine quantité, le volume de fer, qui à Paris marquait un kilogramme, ferait bien moins fléchir le ressort au sommet des Alpes, et le ferait fléchir vingt-six ou vingt-sept fois davantage à la surface du soleil; son poids évalué de cette manière changerait donc avec la pesanteur, et cependant sa masse ne changerait pas. Le poids donné par la balance peut être appelé poids relatif; celui qui est donné par le ressort peut être appelé poids absolu : alors il est vrai de dire que *la masse d'un corps est proportionnelle à son poids relatif*, ou bien qu'elle est proportionnelle à son poids absolu divisé par l'intensité de la pesanteur.

Il se pourrait qu'il y eût dans la nature des substances

impondérables, sur lesquelles la pesanteur n'exerçât aucune espèce d'action; ces substances sans pesanteur seraient aussi sans poids, mais elles ne seraient pas sans masse. Seulement toute comparaison serait impossible entre elles et les masses pesantes, tant qu'on n'aurait pas découvert quelque force, ou instantanée ou constante, qui pût agir sur les substances des deux espèces. Une substance impondérable qui serait agrégée à la matière pesante pour constituer les corps, deviendrait une cause capable de retarder les mouvemens dus à la pesanteur; elle agirait comme les masses m qui se font équilibre dans la machine d'Atwood, car elle partagerait le mouvement imprimé par la gravité. De ce qu'on n'observe aucun retard de cette espèce, on n'en peut pas conclure qu'il n'y a pas dans les corps de substances impondérables, mais seulement que, s'il y en a, elles y sont en masse très-petite à l'égard de la masse pondérable, ou qu'elles n'y sont pas agrégées d'une manière permanente, mais que les corps pesans la quittent quand ils se déplacent.

La densité d'un corps est égale au rapport de son poids à son volume (*); ce rapport est très-essentiel à considérer; il est pour chaque substance une propriété permanente, et souvent même il devient une propriété caractéristique. Un centimètre cube d'eau distillée de Paris pèse un gramme, c'est là notre définition, et s'il arrive que le même volume d'eau pèse le même poids dans tous les pays du monde, on ne s'en étonne pas beaucoup. Mais un centimètre cube de fer pèse $7^{g},8$, soit qu'on l'ait tiré des mines de Suède, de France ou d'Amérique, et quelles que soient les combinaisons desquelles on l'ait dégagé pour l'avoir pur. Pareillement un centimètre cube d'or pur pèse $19^{g},258$, soit qu'on l'ait tiré des mines du Pérou ou de celles du Japon.

(*) La densité s'appelle aussi *pesanteur spécifique*: pour que cette expression soit juste, il faut entendre que *pesanteur spécifique*, ou *pesanteur sous un volume donné*, signifie *poids sous un volume donné*.

Le poids, sous un volume donné, c'est-à-dire la densité, est donc une propriété très-fixe dans chaque substance; bien entendu qu'il faut prendre le volume à la même température; car nous avons vu que la chaleur dilate tous les corps. Nous apprendrons plus tard à déterminer les densités; pour le moment, nous les supposerons connues et nous apprendrons seulement à nous en servir. De la définition que nous en avons donnée, il résulte :

1°. Qu'à volume égal les densités des corps sont proportionnelles à leurs poids;

2°. Qu'à poids égal les densités sont en raison inverse des volumes;

3°. Qu'en général les densités sont comme le rapport direct des poids, multiplié par le rapport inverse des volumes;

4°. Que le poids d'un corps est égal à son volume multiplié par sa densité;

5°. Que le volume d'un corps est égal à son poids divisé par sa densité.

Il importe d'avoir compris ces sortes de formules et d'en avoir fait plusieurs applications, pour les avoir bien présentes à l'esprit.

CHAPITRE IV.

Du Pendule.

46. Le pendule ordinaire se compose d'une boule pesante suspendue à l'extrémité d'un fil flexible (*Fig.* 56). Ses propriétés les plus fondamentales sont, 1° de marquer la direction verticale ou celle de la pesanteur, comme nous l'avons vu dans le chapitre Ier; 2° de faire des oscillations planes quand on l'écarte de la verticale, et qu'on l'abandonne à lui-même sans lui donner aucune impulsion. En effet, si on met le pendule dans une position quelconque FA, et qu'on le laisse tomber librement, il descend jusqu'en L, dépasse ce point, remonte de l'autre côté jusqu'en A′, en décrivant un arc LA′ égal à l'arc LA, ensuite il tombe de nouveau, arrive en L, remonte en A, et continue ainsi son mouvement pendant très-long-temps. On peut remarquer que, quand le pendule descend, la vitesse va en augmentant jusqu'en L, et qu'au contraire quand il remonte, elle va en décroissant depuis le point L jusqu'au point où il s'arrête.

L'angle AFL s'appelle *l'angle d'écart*, ou simplement *l'écart*.

Le mouvement de A en A′ ou de A′ en A est ce qu'on appelle une *oscillation*, de A en L une *demi-oscillation descendante*, et de L en A′ une *demi-oscillation ascendante*.

L'*amplitude* de l'oscillation est l'arc AA′ mesuré en degrés, minutes et secondes.

La *durée* d'une oscillation est le temps que le pendule met à parcourir cet arc.

La première conséquence qui se présente après ces observations, c'est que le mouvement du pendule est le mou-

vement perpétuel car, si en partant de A, il remonte à une hauteur A′ qui soit la même, il faut aussi qu'en partant de A′ il revienne exactement en A; et, ce qu'il a fait la première fois, il le fera la seconde, la troisième et ainsi de suite perpétuellement.

Cette conclusion serait de toute rigueur, si en effet la hauteur du point A′, où il arrive, était exactement égale à la hauteur du point A, d'où il est parti; mais les frottemens du point de suspension F, et la résistance de l'air que la boule doit pousser devant elle, empêche que cette égalité ne soit absolue. La différence ne devient sensible qu'après un certain nombre d'oscillations; et loin de s'étonner que le mouvement ne soit pas perpétuel, on s'étonne qu'il puisse se continuer pendant si long-temps : car un pendule peut, sans s'arrêter, faire des oscillations pendant des heures entières.

Le pendule est un des instrumens les plus simples de la physique, et cependant il est un des plus curieux à étudier, parce qu'il sert à la mesure exacte du temps, à la détermination de la figure de la terre, et à l'une des questions les plus importantes sur la gravitation générale de la matière.

47. *Lois des oscillations du Pendule.* — 1°. La durée des oscillations qui sont *très-petites* est indépendante de leur amplitude. On dit qu'elles sont *isochrones*, pour exprimer qu'elles se font toutes dans le même temps. Les oscillations de 4 ou 5 degrés d'amplitude ne sont plus des oscillations très-petites, elles commencent à avoir une durée sensiblement plus grande.

2°. La durée des oscillations est tout-à-fait indépendante du poids de la boule et de la nature de sa substance.

3°. Les durées des oscillations sont entre elles comme les racines carrées des longueurs des pendules.

Ces lois se déduisent rigoureusement des principes de mécanique, mais en physique on les démontre approximativement par l'expérience.

48. La première loi exigerait trop de temps pour qu'on essayât de la démontrer dans un cours : puisqu'il faudrait compter plusieurs centaines d'oscillations ; les unes au commencement, quand l'amplitude est de 4 ou 5 degrés ; les autres un peu plus tard, quand elles sont réduites à 2 ou 3 degrés ; et les dernières vers la fin du mouvement, quand elles ne sont plus sensibles à l'œil, et qu'il faut les observer avec une lunette. On s'étonne d'abord que le pendule mette presque autant de temps à parcourir un arc de $\frac{1}{10}$ de degré qu'à parcourir un arc de 10 degrés, qui est par conséquent cent fois plus grand ; mais on en conçoit la raison en observant que, dans le deuxième cas, la pesanteur lui imprime beaucoup plus de vitesse, parce qu'elle agit plus obliquement et d'une manière plus efficace. Cette *loi de l'isochronisme* est une des premières découvertes de Galilée : on rapporte que, étant très-jeune encore, il vit par hasard, dans l'église métropolitaine de Pise, les balancemens d'une lampe suspendue à la voûte, et qu'il resta très-frappé des retours périodiques de ces mouvemens et de l'égalité de leur durée. Il n'en fallut pas davantage pour éveiller son génie, et cette observation d'un enfant devint la source des plus grandes découvertes.

49. La seconde loi se démontre facilement.

On prend différentes boules, de métal, d'ivoire, ou d'autres substances ; on en compose des pendules de même longueur, que l'on fait osciller ensemble, et l'on voit que tous ces pendules restent d'accord pendant très-long-temps.

Quand la pesanteur agit pour faire osciller un pendule, elle agit séparément sur chacun des atomes de matière qui composent la boule ; ainsi un seul atome de fer, par exemple, suspendu à l'extrémité du fil, doit osciller avec la même vitesse que deux atomes pris ensemble, puisqu'ils ont leur force séparée, et que cette force a pour chacun

d'eux la même intensité; il doit osciller comme le ferait une réunion quelconque d'atomes; et en effet, sans les résistances et les frottemens, il oscillerait comme une grande boule de fer. De plus, la pesanteur agissant de la même manière sur toutes les substances, un atome de fer doit osciller comme un atome d'ivoire, d'or, ou de platine, et par conséquent toutes les masses, quelle que soit leur nature, doivent osciller avec la même vitesse. Cette expérience est importante, puisqu'elle donne une autre preuve que la pesanteur agit de la même manière sur tous les corps. L'expérience que nous en avons déjà faite dans le tube vide d'air n'est qu'une expérience grossière, puisque la pesanteur n'agit que pendant quelques fractions de secondes, tandis qu'avec le pendule nous pouvons observer ses effets sur les différens corps pendant des heures entières. Ils ne tombent, il est vrai, que dans l'arc d'oscillation, qui se replie sur lui-même un grand nombre de fois; mais il est évident que, pour la conséquence qui nous occupe, c'est comme s'ils tombaient d'un mouvement rectiligne et progressif. C'est par des observations de cette espèce, mais qui exigeraient beaucoup de soins et de précision, que l'on pourrait découvrir s'il existe en effet, dans l'intérieur des corps, quelque substance impondérable, agrégée d'une manière permanente à la matière pondérable, et ayant, par rapport à elle, une masse sensible à volume égal. On ne peut rien déduire des observations de Mairan sur ce sujet; elles n'ont point été faites dans cette vue, et elles datent d'une époque où l'on aurait vainement cherché le degré de précision auquel on peut atteindre aujourd'hui.

5o. La troisième loi se démontre avec des pendules de diverses longueurs : si, par exemple, on prend trois pendules, dont les longueurs soient entre elles comme les nombres 1, 4, 9, alors les durées des oscillations doivent être comme les nombres simples, 1, 2, 3; et, en effet, si

on fait osciller de tels pendules, soit en les suspendant au devant l'un de l'autre, soit en les ajustant par un double fil (*Fig.* 59), on compte facilement que celui dont la longueur est 1, comparé à celui dont la longueur est 4, fait deux oscillations pour une, et qu'il en fait trois pour une, quand on le compare à celui dont la longueur est 9. Ce n'est que par des considérations mécaniques que l'on peut se rendre un compte exact de ce résultat important.

51. *De l'Intensité de la Pesanteur, du Pendule simple, du Pendule absolu, et du Pendule invariable.* — Les lois dont nous venons de parler sont tout-à-fait indépendantes de l'intensité de la pesanteur. Supposez que cette force devienne cent fois plus intense ou cent fois plus faible, les petites oscillations seraient encore isochrones entre elles, et leur durée conserverait encore le même rapport avec les poids des pendules et avec leurs longueurs. Mais, bien que ces lois ne changent pas avec l'intensité de la force, il y a cependant quelque chose qui change, c'est la durée absolue de chaque oscillation. Si la pesanteur cessait d'agir à un instant donné, les corps cesseraient de tomber, et les pendules cesseraient d'osciller; ou, du moins, les corps ne tomberaient plus qu'en vertu de leur vitesse acquise, et les pendules qui sont actuellement en mouvement décriraient des cercles entiers, sans être rappelés dans la verticale et sans être arrêtés par autre chose que par le frottement. Au contraire, si la pesanteur venait à doubler d'intensité, les corps tomberaient plus vite, et les pendules seraient plus prompts dans les retours de leurs battemens.

Mais le vrai rapport qui existe entre la durée des oscillations, la longueur du pendule et l'intensité de la pesanteur ne peut être trouvé que par les lois de la mécanique, et il ne peut être exprimé que par une formule qu'il est très-important de connaître.

Soit l la longueur d'un pendule quelconque, exprimée en mètres.

Soit T la durée d'une oscillation de ce pendule, exprimée en secondes sexagésimales.

Soit π le rapport approché de la circonférence au diamètre, dont la valeur est, comme on sait, $\pi = 3,1415926$.

Enfin soit g l'intensité de la pesanteur, c'est-à-dire le nombre de mètres qui exprime la vitesse d'un corps, après une seconde de chute libre.

On aura pour la formule du pendule

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \text{ d'où } g = \frac{\pi^2 l}{T^2};$$

c'est-à-dire que l'intensité absolue de la pesanteur est égale au carré du rapport approché de la circonférence au diamètre, multiplié par la longueur du pendule qu'on observe, et divisé par le carré du temps d'une oscillation.

Pour avoir l'intensité de la pesanteur, il suffira donc de faire osciller un pendule, d'en mesurer la longueur pour avoir l, d'observer la durée d'une oscillation pour avoir T, et de faire ensuite les calculs indiqués.

Cette formule est celle qui convient au pendule *simple*; on appelle ainsi un pendule idéal, qu'il est facile de concevoir, mais qu'il est impossible de construire. Il se composerait d'un fil inextensible et sans pesanteur, à l'extrémité duquel serait fixée une seule molécule de matière pesante.

52. Tout pendule qui n'est pas simple, comme le précédent, s'appelle *pendule composé*; ainsi un fil inflexible et sans pesanteur, auquel seraient attachées seulement deux molécules pesantes, l et L (*Fig.* 57), formerait un pendule composé. Dans cet appareil, la vitesse d'oscillation se *compose* en effet des vitesses d'oscillation que prendrait séparément chacune des petites masses, en oscillant librement. La molécule l, qui n'est qu'à la distance

F*l* du point de suspension, tend à osciller plus vite que la molécule L, qui en est à la distance FL; mais, puisqu'elles sont liées l'une à l'autre, forcées de marcher ensemble et d'accomplir leur oscillation dans le même temps, la première est retardée par la seconde, et la seconde accélérée par la première : de là, une vitesse intermédiaire, qui est la vitesse du pendule composé. Dans tout corps qui oscille, il se fait une compensation analogue, entre toutes les vitesses différentes que prendraient les diverses molécules, si chacune d'elles oscillait librement. Pour faire mieux entendre cette vérité fondamentale, nous prendrons encore un exemple : F*p*. (*Fig.* 58) représente un pendule ordinaire, tel à peu près que ceux qui servent de régulateurs aux horloges; F est le point fixe, F*t* est ce qu'on appelle la tige, et *ll'* la lentille. Le point *m*, et ceux qui sont comme lui très voisins de l'axe de suspension, marcheraient très-vite, s'ils étaient seuls. Au contraire, le point extrême *p*, et ceux qui sont comme lui très-bas, ne pourraient marcher que très lentement. Les premiers sont donc retardés par l'effort qu'ils font pour entraîner les derniers, et ceux-ci sont accélérés par l'impulsion qu'ils en reçoivent. Donc, entre le point *m* et le point *p* il y a un certain point C, qui n'est, lui, ni retardé ni accéléré, et qui fait son oscillation exactement comme s'il était seul, et librement suspendu à l'extrémité du fil FC; ce point remarquable est appelé le *centre d'oscillation*. Dans tout pendule composé il se trouve nécessairement un ou plusieurs centres d'oscillation, et leur distance *commune* au point de suspension est ce que l'on nomme la *longueur du pendule*. Cette longueur est en effet égale à celle du pendule simple, qui oscillerait avec la même vitesse que le pendule composé. Le centre d'oscillation dépend de la forme du corps qui oscille, quand ce corps est homogène; et il dépend de sa forme et de la densité de ses parties, quand il est hétérogène. Un pendule tout

en cuivre aurait, par exemple, son centre d'oscillation en C (*Fig.* 38), quand sa tige serait très épaisse, et en C′, si elle se réduisait à un fil. Un petit poids que l'on ajouterait vers l'extrémité inférieure *p*, ferait descendre encore le centre d'oscillation, et il le ferait remonter, si on l'ajoutait vers le haut. Aussi voit-on, dans quelques horloges, un *curseur* pesant, qui peut glisser le long de la tige du pendule, et que l'on fait descendre ou monter pour faire retarder ou avancer l'horloge; mais le plus souvent cet effet se produit par la lentille elle-même, qui peut être relevée ou rabaissée par un petit mouvement de vis.

Puisque nous ne pouvons employer que des pendules composés, on voit, d'après ce qui précède, que, pour déterminer l'intensité de la pesanteur par les observations du pendule, il se présente deux grandes difficultés : Premièrement, celle d'observer avec précision la durée d'une oscillation; secondement, celle de déterminer avec exactitude la longueur du pendule que l'on fait osciller : car ce n'est qu'après avoir trouvé ces deux élémens essentiels, que le pendule composé peut être *ramené* au cas du pendule simple, et qu'il est permis d'employer la formule $T = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, pour en tirer la valeur g de l'intensité de la pesanteur.

Borda est le premier physicien qui nous ait donné une méthode exacte pour mesurer le pendule : il avait le génie des recherches de cette espèce, car il avait le génie de la précision. Ses expériences furent faites, en 1790, à l'Observatoire de Paris, et l'on peut dire qu'avant cette époque il n'y avait pas un lieu de la terre où la force de la pesanteur fût connue. MM. Biot, Bouvard et Mathieu ont répété les mêmes expériences en 1808, d'après les procédés de Borda et avec des instrumens analogues. En 1818, M. Arago et M. de Humboldt en ont fait encore

une vérification par d'autres procédés. Toutes ces expériences confirment l'exactitude de celles de Borda, et il en résulte enfin que l'intensité de la pesanteur est, à Paris, telle qu'il l'avait trouvée, savoir de $9^m,8088$. C'est-à-dire qu'un corps qui tombe dans le vide pendant une seconde, acquiert une telle vitesse que, si la pesanteur cessait d'agir sur lui, il parcourait $9^m,8088$ dans toutes les secondes suivantes. Ce qui peut s'exprimer encore en disant qu'un corps qui se meut dans le vide, en partant du repos, parcourt en $1''$ un espace qui est de $4^m,9044$; car nous avons vu que la vitesse qui a lieu après l'unité de temps est double de l'espace parcouru pendant cette unité.

53. Il faut avoir une grande habitude des expériences, et même des expériences de cette nature, pour comprendre les soins minutieux, les corrections délicates qu'elles exigent, et toute l'habileté qu'elles supposent dans l'observateur; mais il est si important d'avoir une idée générale des méthodes d'observation que nous devons indiquer ici ce qu'il y a de plus essentiel dans la méthode de Borda. Son pendule s'appelle *pendule absolu;* il se compose d'une boule pesante, suspendue par un fil très-fin (*Fig.* 65). La boule étant homogène et parfaitement sphérique, et le fil étant lui-même homogène, quoique d'une autre substance, on peut calculer exactement le lieu du centre d'oscillation. Ayant trouvé, par exemple, qu'il est en c, on voit qu'il suffit alors de mesurer la longueur totale, depuis le point de suspension jusqu'au point t, et d'en retrancher ct pour avoir la vraie longueur du pendule.

La boule est en platine; on choisit ce métal, parce qu'il est le plus inaltérable, et aussi parce qu'il est le plus dense, et par conséquent le moins sensible à la résistance de l'air. Sur la boule, s'ajuste une calotte exactement du même rayon qu'elle; et l'adhérence qui s'établit entre leurs surfaces, au moyen d'une légère couche de graisse, suffit seule pour soutenir tout le poids de la boule. Le fil de suspension

est un fil de cuivre, qui, d'une part, traverse en son milieu l'extrémité de la queue de la calotte, et vient se fixer entre les deux pièces dont cette queue se compose, et qui va, de l'autre part, s'attacher de la même manière par son extrémité supérieure. Cette seconde pièce, qui pince l'extrémité supérieure du fil, vient s'adapter à l'appareil de suspension que l'on voit dans la *figure* 65. Il se compose, 1° d'un prisme d'acier, que l'on appelle le *couteau du pendule*, parce qu'en effet il a un tranchant assez vif, par lequel il repose sur des plans d'agate, et 2° d'un cylindre d'acier qui traverse le couteau perpendiculairement et qui vient recevoir la pièce qui porte le fil.

La *figure* 66 représente la disposition générale de l'appareil.

Pour déterminer la durée d'une oscillation, on met le pendule en mouvement à une heure fixe, marquée sur une bonne pendule ou sur un bon chronomètre; puis on le laisse osciller pendant plusieurs heures, et on observe l'instant précis où il achève sa dernière oscillation. Le temps qui s'est écoulé entre le commencement de la première oscillation et la fin de la dernière est le temps pendant lequel le pendule a marché : soit $4^h\ 10'$ ou $15000''$. Si l'on savait maintenant combien il y a d'oscillations, si l'on savait, par exemple, qu'il en a fait 20000, on dirait : En $15000''$ il a fait 20000 oscillations, d'égale durée; donc pour une seule oscillation il a employé $\frac{3''}{4}$; et si l'on ne s'est pas trompé d'une oscillation sur ces 20000, il en résulte qu'on ne se sera pas trompé de $\frac{3''}{80000}$ ou de $\frac{1}{26666}$ de seconde, sur la durée de chaque oscillation.

Mais comment trouver ce nombre exact d'oscillations? L'on conçoit bien que l'observateur ne peut pas les compter une à une; il y aurait trop d'ennui, et surtout trop de chances d'erreur; aussi, l'on y parvient plus ingénieuse-

ment. On a même pour cela deux moyens qui sont également sûrs; le premier est d'avoir un compteur, que l'on règle sur le pendule par des essais préalables: une fois qu'ils sont d'accord, il ne reste à l'observateur qu'à veiller les dérangemens qui peuvent survenir par le décroissement d'amplitude dans les oscillations du pendule et à presser le compteur avec la main, ou autrement, pour le remettre d'accord. On lit sur le cadran du compteur le nombre des oscillations qu'il a faites, et c'est aussi le nombre exact des oscillations du pendule. L'autre moyen est ce que l'on appelle la *méthode des coïncidences;* c'est celui qui a été employé par Borda. Il consiste à placer le pendule au devant d'une horloge, comme on le voit dans la *figure* 66, et à lui donner une telle longueur que ses oscillations soient un peu plus lentes ou un peu plus rapides que celles de l'horloge. On les fait partir ensemble, et on les observe avec un grand soin; dès les premières oscillations, on les voit qui se séparent. Le pendule, par exemple, sera en retard sur l'horloge, et ils se sépareront de plus en plus jusqu'à ce qu'enfin l'horloge ayant gagné d'avance une oscillation juste, ils se retrouvent ensemble comme au départ: c'est là ce qu'on appelle une *coïncidence.* Il suffira donc que l'observateur tienne un compte exact de toutes les coïncidences qui ont lieu pendant les cinq ou six heures que dure une expérience, et alors, par le temps qui s'est écoulé, il connaît le nombre total des oscillations de l'horloge; par le nombre des coïncidences, il connaît l'avance qu'elle a prise. D'où il conclut enfin le nombre des oscillations du pendule, et par suite la durée de chaque oscillation.

Pour mesurer ensuite la longueur du pendule, on se sert d'un plan d'acier poli, qu'on ajuste très-exactement au dessous de la boule et très-solidement (*Fig.* 66). On le soulève peu à peu par le mouvement d'une vis, sans qu'il cesse d'être horizontal; enfin, quand il arrive à toucher la boule, de manière qu'elle le rase légèrement en faisant ses

oscillations, on est bien assuré que la distance de ce plan aux plans fixes qui portent le couteau, est précisément la distance qui se trouve entre le tranchant du couteau et le point le plus bas de la boule; alors on enlève le pendule, et à sa place on ajuste une règle divisée, qui repose sur les plans fixes par un couteau tout-à-fait semblable au couteau du pendule (*Fig.* 69). Cette règle est représentée de face dans la *figure.* 68, et de profil dans la *figure* 67. On voit une languette l, qui sort ou qui rentre par le mouvement de la vis v. Quand la règle a pris la place du pendule, on fait sortir la languette peu à peu jusqu'à ce qu'elle vienne effleurer le plan d'acier, comme faisait le point t de la boule. Des divisions tracées sur la languette et sur la règle font connaître la longueur absolue, qui se trouve alors depuis le tranchant du couteau jusqu'à l'extrémité de la languette; on se sert aussi pour cet objet du *comparateur* représenté *figure* 70. Connaissant cette distance, on en retranche la distance du centre d'oscillation au point le plus bas de la boule, et l'on a enfin la longueur du pendule. Cette longueur l, et la durée τ de l'oscillation correspondante étant substituées dans la formule $\tau = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, on en déduit enfin la valeur de g. Avec ces données, il est très-facile de calculer la longueur du *pendule à secondes*, c'est-à-dire du pendule qui ferait juste une oscillation par seconde; et il est clair que l'intensité de la pesanteur est aussi bien définie par la longueur du pendule à secondes que la valeur de g, puisqu'au moyen de la formule, l'un de ces élémens peut se déduire de l'autre.

On emploie le *pendule décimal* ou le *pendule sexagésimal.* Ces dénominations sont relatives au temps, car un *jour solaire moyen* se divise tantôt en parties décimales, tantôt en parties sexagésimales. Dans le premier cas, le jour se compose de 10 heures, chaque heure de 100′ et chaque minute de 100″, ce qui fait 100000″ décimales en un jour;

dans le second cas, le jour se divise en 24 heures, chaque heure en 60′ et chaque minute en″, ce qui fait 86400″ sexagésimales en un jour. Le pendule décimal est celui qui fait une oscillation en 1″ décimale, et le pendule sexagésimal celui qui fait une oscillation en 1″ sexagésimale.

A Paris la longueur du pendule sexagésimal est de $993^{mm},8267$ d'après les mesures de Borda. Les mesures qui en ont été prises depuis ne surpassent celle-ci que de 18 millièmes de millimètre.

A Londres, la longueur du pendule sexagésimal est de $994^{mm},1147$. Elle a été déterminée en 1818, par le capitaine Kater, au moyen d'un appareil de son invention, qui est très-ingénieux et qui est susceptible d'une grande exactitude (*Fig.* 62, 63 et 64). C'est un pendule à forte tige et à lentille, portant deux couteaux fixes, tellement disposés, que le tranchant de l'un passe par les centres d'oscillation de l'autre. Ainsi, après avoir fait osciller le pendule sur l'un des couteaux, on le retourne de haut en bas pour le faire osciller sur l'autre, et l'on retrouve exactement la même durée d'oscillation. C'est donc ici la distance des deux tranchans qui est la vraie longueur du pendule, et on peut la mesurer avec une grande précision.

54. Pour déterminer l'intensité de la pesanteur en divers lieux de la terre, il faudrait faire, dans chacun de ces lieux, ce qui a été fait à Paris ou à Londres. Mais on peut y parvenir encore par un autre moyen, qui offre de grands avantages lorsqu'il s'agit de parcourir les mers et d'aborder sur des côtes désertes, où il est impossible de s'établir d'une manière permanente, comme dans un observatoire. Ce moyen consiste à employer le pendule que l'on appelle *pendule invariable*. Il se compose d'une forte tige de cuivre ou de bois, qui est traversée dans sa partie supérieure par un couteau semblable à celui du pendule, et qui porte à sa partie inférieure une lentille pesante, amincie sur les bords, pour mieux fendre l'air dans ses oscillations. Un trépied

solide est destiné à porter le plan d'agate sur lequel on pose le couteau du pendule, lorsqu'on veut le mettre en expérience. Ce trépied lui-même doit reposer sur un sol inébranlable, et, pour cela, le voyageur emporte avec lui des massifs de pierre de taille, qu'il se contente d'établir à quelques pieds de profondeur quand il est en terre-ferme, et qu'il établit sur pilotis quand il est en terre sablonneuse. C'est sur cette base solide que l'on fait osciller le pendule invariable, avec infiniment de soins et de précautions. On ne mesure point sa longueur, mais on compte, avec une grande exactitude, le nombre des oscillations qu'il fait dans un temps donné. Supposons qu'un navigateur ait fait le tour du monde avec un pendule de cette espèce, et qu'il l'ait observé en cent endroits différens, sur les sommets des îles, au milieu de l'Océan, sur les grandes côtes des deux mondes, et sur les terres volcaniques. Au retour de son voyage, qu'il vienne à Paris ou à Londres, faire osciller ce même pendule: il en pourra conclure l'intensité absolue de la pesanteur, pour tous les lieux où il a fait ses stations; car le pendule étant le même, l'intensité de la pesanteur dans un de ces lieux, et l'intensité de la pesanteur à Paris, par exemple, seront entre elles en raison inverse des carrés des temps d'une oscillation. Ce n'est plus qu'une règle de trois, dont un seul terme est inconnu. C'est ainsi que l'on est parvenu à déterminer l'intensité de la pesanteur en plusieurs points de la terre.

M. Biot l'a déterminée, au moyen du pendule absolu, sur plusieurs points du méridien de Paris, dans une étendue d'environ 550 lieues: depuis les îles Baléares, sur les côtes de l'Espagne, jusqu'aux îles Shetland, les plus septentrionales des Orcades; et aussi, en 1825, en plusieurs points de la Sicile et de l'Italie. D'autres observateurs ont employé le pendule invariable en différens lieux: le capitaine Kater en Écosse et en Angleterre, en 1817 et 1818; le capitaine Freycinet, dans un voyage de découvertes autour

du monde, de 1817 à 1820; le cpitaine Duperrey, dans un voyage semblable, de 1822 à 1824; et le capitaine Sabine, de 1821 à 1824, dans divers voyages en Afrique et en Amérique, depuis l'équateur jusqu'à la latitude septentrionale de 79°.

Dans le tableau qui termine ce chapitre, nous avons essayé de réunir les résultats de toutes ces observations.

54. *De la Figure de la Terre.* — On sait que les plus hautes montagnes ne sont que de très-petites éminences, par rapport au globe de la terre : tels à peu près que seraient des grains de sable, disséminés sur un globe d'un mètre de rayon; il paraît que les plus grands bassins des mers ne sont que de petites cavités, analogues aux saillies des montagnes. Ainsi, prise dans son ensemble, la surface de la terre est sensiblement régulière, et peut être considérée comme telle dans les calculs. Les plus anciens astronomes avaient reconnu sa courbure, et, comme dans leurs idées la sphère était la forme la plus parfaite, ils n'avaient pas douté que la terre ne fût une sphère très-exacte; on peut même présumer, d'après quelques documens historiques, qu'ils avaient fait de grands efforts pour en mesurer les dimensions, et qu'enfin ils y étaient parvenus d'une manière assez approchée. Cependant la terre n'est point sphérique. Newton avait annoncé qu'elle est aplatie vers les pôles et renflée à l'équateur, et cette vérité a été démontrée dans le dernier siècle par des mesures directes. Cette découverte, qui a exigé d'immenses travaux, n'est encore qu'un premier pas dans la grande question de la figure de la terre; après avoir démontré qu'elle n'est pas sphérique, il faut démontrer maintenant de combien elle est aplatie, et reconnaître toutes les irrégularités et tous les accidens qu'elle présente. Pour trouver le poids des planètes et les dimensions du système du monde, il n'a fallu que quelques hommes de génie; pour trouver la forme exacte de la terre dans toute l'étendue de sa surface, il faut de plus le concours

des peuples et des gouvernemens. Cependant, de nombreux voyages heureusement exécutés; de grandes opérations, les unes terminées avec succès, les autres commencées par des savans habiles et protégées par les gouvernemens des deux mondes; un grand zèle de toutes parts, chez tous les peuples savans, tout semble annoncer que le problème de la figure de la terre sera enfin résolu, et que sa solution sera un des monumens scientifiques de notre siècle.

Si la terre était solide dans toute sa masse, ou seulement dans toute la couche extérieure qui sert d'enveloppe aux parties centrales, elle pourrait avoir une forme quelconque, et n'être ni sphérique ni sphéroïdale: seulement, il y aurait un certain rapport entre sa forme et les périodes de ses mouvemens. Au contraire, si la terre était toute fluide, elle aurait nécessairement la forme d'un sphéroïde, ou d'une sphère aplatie aux deux pôles; car la force centrifuge, qui résulte du mouvement de rotation qu'elle accomplit sans cesse sur son axe, repoussant le fluide de plus en plus, l'accumulerait vers les régions de l'équateur, où elle le soutiendrait à un niveau plus élevé. Le globe entier de la terre étant composé en même temps, des substances solides qui forment les continens et les montagnes, et de la masse fluide qui remplit les bassins des mers, on voit qu'il y a deux questions à se proposer sur la figure de la terre: savoir: quelle est la forme générale de la surface solide des continens, et quelle est la forme de la surface des eaux Pour celle-ci, il faut bien qu'elle soit renflée à l'équateur, car rien ne s'oppose à l'effet actuel de la force centrifuge: les eaux de l'Océan cèdent à son action, malgré les îles et les sinuosités des grandes côtes, à peu près comme elles feraient si elles avaient leur niveau élevé de plusieurs mille mètres au dessus des sommets des montagnes. Ainsi, si tout à coup le mouvement de rotation de la terre était arrêté, on verrait à l'instant l'excès des eaux soulevées par la force centrifuge se précipiter de l'équateur vers les pôles. A l'é-

quateur le niveau baisserait, non pas de quelques mètres, mais probablement de quelques lieues; les rescifs et les hauts-fonds deviendraient des sommets de montagnes et des plateaux élevés; les flancs de la mer seraient d'immenses collines; et sans doute, dans une vaste étendue de pays, le fonds de la mer lui-même formerait des plaines et des vallées. Au pôle arriverait un déluge : les continens seraient submergés, les montagnes de glace seraient arrachées et soulevées par les eaux; elles deviendraient flottantes comme des vaisseaux, et sans doute, au milieu de cette désolation, elles seraient le refuge le plus assuré; mais ce n'est que vers les pôles que l'on peut naviguer avec des vaisseaux de cette espèce.

Pour nous, dans notre région moyenne, nous n'aurions pas de grands changemens à redouter; entre un déluge vers le nord et un affaissement des eaux vers le midi, la mer Méditerranée et la Manche resteraient à peu près à leur niveau. Seulement, nous verrions passer sur nos côtes cette prodigieuse marée, allant du midi vers le nord, emportant sous les pôles d'immenses débris de la zône torride; et peut-être aurions-nous à craindre qu'en passant elle n'en couvrît nos terres. Dans l'hypothèse d'une fluidité complète, le niveau baisserait à l'équateur de 6957 mètres, il s'éleverait au pôle de 13915^{m}, il resterait le même à la latitude de 35° 16′, et à Paris il s'éleverait de 2000 mètres au dessus de la plateforme de l'Observatoire. Telle est, dans l'équilibre général, l'influence de la force centrifuge qui résulte du mouvement de rotation de la terre; et telle est l'idée que nous pouvons prendre de cette cause permanente qui maintient la surface mobile de la mer, toujours renflée à l'équateur et aplatie vers les pôles.

Quant à la forme générale de la surface solide des continens, il résulte aussi des observations qui ont été faites, qu'elle est elle-même aplatie comme la surface des eaux, ou à peu près; c'est-à-dire qu'elle offre la même courbure que

si le globe entier de la terre, ayant été fluide autrefois, ne se fût consolidé qu'après avoir tourné sur lui-même, comme il tourne aujourd'hui, et après avoir reçu la forme qui résulte nécessairement de ce mouvement de rotation. Une preuve frappante de l'aplatissement de la surface continentale, c'est que les montagnes des régions polaires ne sont pas très-élevées au dessus du niveau de la mer; et cependant si la surface de la terre était sphérique, tandis que la surface des eaux est aplatie, on voit qu'à l'équateur les montagnes devraient être moins hautes qu'au pôle de toute la valeur de l'aplatissement, c'est-à-dire de 4 à 5 lieues; tandis qu'il paraît au contraire que les montagnes de l'équateur restent encore plus élevées que celles du pôle.

Si l'on était sûr qu'en effet la terre eût été autrefois liquide, on pourrait calculer l'aplatissement qu'elle a dû prendre, et par conséquent l'aplatissement qu'elle conserve aujourd'hui; ou du moins on pourrait calculer les limites entre lesquelles il resterait compris, en faisant toutes les hypothèses plausibles sur la densité des couches intérieures. Alors il serait curieux de la mesurer dans toutes ses dimensions, pour vérifier cette belle déduction des principes et des lois de la mécanique. Mais l'incertitude où nous sommes sur les époques qui remontent au delà de quelques siècles, donnent encore plus d'importance à ces mesures directes; car si la terre n'a pas été fluide, il est possible qu'elle soit inégale et bosselée, et que sa surface, au lieu d'être régulièrement aplatie, comme celle d'un sphéroïde, soit simplement aplatie par quelques causes accidentelles, et qu'elle offre du reste de grandes inégalités, dépendant de l'inégale distribution et de l'inégale densité des matières intérieures. Ainsi, dans tous les cas, la détermination directe de la figure de la terre est une des plus curieuses et des plus importantes questions que nous puissions nous proposer. On essaie de la résoudre par deux moyens: par les opérations géodésiques et par les observations du pendule.

56. Pour exécuter les mesures géodésiques, on choisit, dans une grande étendue de pays, des points remarquables, comme des crêtes de montagnes, des pointes de clocher, ou des sommets d'édifice, de la fixité desquels on soit très-assuré. On les choisit de telle manière que, de chacun, on puisse en apercevoir au moins deux autres. Enfin on mesure, avec toute la précision possible, une longue *base* dont les deux extrémités deviennent des points fixes analogues aux précédens. Alors tous ces points sont enchaînés par des triangles, c'est-à-dire que l'observateur passe successivement à chacun d'eux, qu'il dirige un rayon visuel à tous les autres points qui, de là, peuvent être visibles, et qu'il mesure avec un grand soin les angles que tous ces rayons visuels font entre eux. On conçoit qu'une pareille chaîne de triangles puisse s'étendre et se prolonger aussi loin que vont les continens; on conçoit même qu'on puisse la faire passer sur la mer, pourvu que de chaque rivage on apercoive quelques points sur le rivage opposé. C'est ainsi que, sur toute la France, un réseau de triangles enchaîne tous les points les plus remarquables. Il en est de même en Angleterre, en Allemagne, en Italie; et de grandes opérations de cette nature se continuent dans le reste de l'Europe, en Amérique, et jusque dans l'Inde, où la Compagnie des Indes prend aussi une part active à la mesure de la terre.

Si cette vaste entreprise était terminée, nous connaîtrions la figure du globe, comme un propriétaire connaît le plan de son domaine; et il n'est personne qui ne comprenne les avantages prodigieux d'une telle connaissance, non-seulement pour la théorie de la terre, mais encore pour les grandes entreprises industrielles et commerciales.

Nous sommes encore loin d'être arrivés à ce point; mais déjà de diverses triangulations locales, exécutées au Pérou; en Pensylvanie, en Italie, en France, en Suède, et au Cap de Bonne-Espérance, on peut conclure d'une manière certaine que la terre est aplatie, et même on peut avoir une

première approximation de son aplatissement. On sait, par exemple, que sur le méridien de Paris la verticale du parallèle de Formentera et celle du parallèle de Dunkerque font entre elles un angle de $12^{\circ}\,22'\,14''$. Ces deux lignes concourent au centre de la terre exactement, ou un peu plus près, ou un peu plus loin. Si, de leur point de rencontre, on décrit un arc de cercle passant par Dunkerque et par Formentera, c'est cet arc qui sera de $12^{\circ}\,22'\,14''$. Or, de la chaîne des triangles on déduit que la distance de ces deux points, comptée sur cet arc de cercle, ou à très-peu près, est, en mètres, de 1374438,72. Donc, si $12^{\circ}\,22'\,14''$ forment cette distance, un seul degré forme une longueur qui est très-facile à trouver; c'est cette longueur que l'on nomme un degré du méridien. Si la terre était sphérique, tous les degrés seraient égaux entre eux et vaudraient le même nombre de mètres, et réciproquement. Donc, au contraire, si l'on trouve que les degrés sont inégaux, on conclura que la terre n'est pas sphérique. On voit (*Fig.* 71) que, si elle est elliptique et aplatie vers les pôles, les verticales de l'équateur qui font entre elles un angle de 1° ou de 10°, vont se rencontrer plutôt que les verticales des pôles qui font le même angle; ainsi l'arc de 1°, compris entre les premières, a une moindre longueur, comme appartenant à un cercle d'un plus petit rayon, que l'arc de 1° compris entre les verticales des pôles; d'où il suit que *vice versâ*, si on trouve les degrés de l'équateur plus petits que les degrés des pôles, on pourra conclure, avec la plus grande certitude, le fait de l'aplatissement.

Or, des arcs dont chacun avait plusieurs degrés d'étendue, ont été mesurés sur divers méridiens et à plusieurs latitudes : au Pérou, par Bouguer et La Condamine; dans l'Inde, par Lambton; au cap de Bonne-Espérance, par Lacaille; en Pensylvanie, par Mason et Dixon; en Italie, par Lemaire et Boscowich; en France, par Delambre et Méchain; en Espagne, sur les côtes de la Méditerranée,

par Arago et Biot; en Angleterre, près de Greenwich, par Roy, Delambre et Méchain; en Suède, par Melanderhielm. De l'ensemble de ces mesures, il résulte deux conséquences: premièrement, que la terre n'est pas sphérique, puisque les degrés sont inégaux à diverses latitudes, et secondement, que la terre est en effet aplatie vers les pôles, puisque les longueurs des degrés vont en croissant à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur. En combinant ces mesures par diverses considérations géométriques, on en peut déduire les longueurs du rayon de la terre pour les diverses latitudes. On trouve alors les résultats suivans :

Rayon de l'équateur. .	6376984 mètres	ou 1434,8	lieues.
Rayon du pôle.	6356324	ou 1430,1	
Différence.	20660	ou 4,7	

L'*aplatissement* est la différence entre les rayons de l'équateur et du pôle divisée par le rayon de l'équateur; il est donc, d'après ces mesures, de $\frac{1}{308,65}$. Le *rayon moyen* de la terre est celui qui correspond à la latitude de 45°; on le trouve de $6336745^m = 1432,4$ lieues. En combinant d'autres mesures, on trouve un autre rayon qui diffère un peu du précédent, et qui est de 6366194. La différence est insensible dans la plupart des applications, puisque 500 mètres ne sont que la dixième partie de la hauteur du Mont-Blanc.

Newton, en supposant que la terre a une densité uniforme, trouvait son aplatissement de $\frac{1}{230}$. Huyghens, en supposant qu'elle a au centre une densité infinie, trouvait $\frac{1}{578}$. M. de La Place, par une théorie plus complète, trouve que l'aplatissement est de $\frac{1}{305}$. Ainsi, non-seulement les géomètres ont pu prédire que la terre est aplatie, mais on voit encore que M. de La Place est parvenu, par la seule puissance de la théorie, à trouver la vraie valeur de cet aplatissement; ce résultat est une preuve frappante de la dépen-

dance qui existe entre les divers phénomènes de la nature, puisque c'est sur les inégalités des mouvemens de la lune, que M. de La Place a fondé ses calculs.

55. Les observations du pendule peuvent servir à déterminer la figure de la terre, en supposant qu'elle est en effet un sphéroïde, composé de couches homogènes, dont la densité varie de l'une à l'autre suivant une loi quelconque : car dans cette hypothèse :

A étant l'aplatissement,

Q la longueur du pendule à l'équateur,

D l'excès de la longueur du pendule au pôle sur sa longueur à l'équateur,

On démontre que ces trois quantités sont liées entre elles par la relation suivante :

$$A = 0{,}00865 - \frac{D}{Q}$$

Le nombre constant 0,00865 est les $\frac{5}{2}$ du quotient de la force centrifuge à l'équateur par la pesanteur.

Il suffirait donc de déterminer les longueurs du pendule à secondes à l'équateur et au pôle : la première longueur donnerait Q, l'excès de la seconde sur la première donnerait D, et il n'y aurait plus à faire qu'une division et une soustraction pour avoir l'aplatissement. On peut même simplifier encore l'opération et se dispenser d'aller au pôle; car, dans l'hypothèse précédente, la pesanteur décroissant, suivant une certaine loi, depuis le pôle jusqu'à l'équateur, il faut que les longueurs des pendules décroissent aussi suivant la même loi; d'où il résulte une relation déterminée entre toutes les longueurs des pendules des diverses latitudes. Cette relation est la suivante :

$$l = Q + D \sin.^2 \lambda.$$

Q et D sont les mêmes que dans la formule précédentes, λ est la latitude,

l est la longueur du pendule à la latitude λ.

Ainsi, au lieu d'observer le pendule à l'équateur et au pôle, on peut l'observer à deux latitudes quelconques, pourvu qu'elles soient assez éloignées l'une de l'autre; mettre successivement pour l chacune des longueurs que l'on trouve, et pour λ la latitude correspondante; de la sorte on obtient deux équations d'où l'on tire les valeurs de Q et de D; et ces valeurs, substituées à leur tour dans la première formule, donnent la grandeur de l'aplatissement. Toutes ces observations, prises deux à deux, quel que soit le lieu où elles aient été faites, devraient, pourvu qu'elles fussent exactes, donner les mêmes valeurs de Q et de D, et par conséquent conduire à la même valeur définitive de l'aplatissement de la terre. D'après cela, on pourrait penser que deux seules observations suffisent, et qu'il n'est pas besoin de se donner tant de peine, ni de tant courir les mers et les continens pour observer le pendule sous toutes les latitudes et dans tous les climats. Mais il faut prendre garde, d'une part, que les formules que nous employons reposent sur des hypothèses qui peuvent plus ou moins s'écarter de la vérité, et que c'est là le point fondamental qu'il faut décider; et, d'une autre part, que les moyens d'observation, quelque précis qu'ils soient, ne peuvent donner un résultat certain que par une moyenne entre plusieurs résultats peu différens.

Les observations du pendule qui ont été faites jusqu'à ce jour dans les deux hémisphères, et à des latitudes très-différentes, depuis l'équateur jusqu'à la dernière ville septentrionale du monde, et même jusqu'aux régions glacées du Groënland et du Spitzberg, donnent pour l'aplatissement des résultats qui ne sont pas absolument conformes aux résultats qui se déduisent des inégalités de la lune, ou des mesures géodésiques. Les différences sont petites; car les moindres valeurs donnent près de $\frac{1}{305}$, qui est le nombre de la théorie, et les plus grandes valeurs ne dépassent

pas $\frac{1}{240}$; mais elles suffisent cependant pour qu'on puisse conclure dès à présent : 1° que la nature du sol sur lequel on fait les observations a une influence sensible sur les oscillations du pendule; 2° qu'elle a par conséquent une influence plus ou moins marquée sur l'équilibre et sur le nivellement des eaux; 3° enfin, que par ces causes la surface de la mer a très-probablement des inégalités plus ou moins grandes, des éminences et des affaissemens, qui ne l'empêchent pas d'être aplatie dans sa direction générale, à peu près comme l'indique la théorie, mais qui l'empêchent d'être une surface géométrique, exactement pareille à celle d'un ellipsoïde de révolution. Ainsi, quelles que soient les causes qui aient agi, à l'origine du monde, et quelles que soient celles qui aient pu se développer dans les catastrophes qui ont suivi, il arrive, comme on pouvait s'y attendre, que dans le sein de la terre toutes les matières ont été confondues, et que, plus pesantes ou plus légères, elles sont à peu près uniformément réparties dans toute l'étendue de chacune des couches. Il fallait qu'il en fût ainsi pour la régularité des mouvemens et pour l'ordre des saisons, car les phénomènes se passeraient d'une tout autre manière, si l'un des hémisphères était, par exemple, léger comme du liége, et l'autre lourd comme du plomb. Cependant cette homogénéité générale n'empêche pas qu'il ne se rencontre, dans le globe de la terre, quelque hétérogénéité locale qui ait déformé sa surface, et qui ait produit, de distance en distance, quelque dépression ou quelque renflement.

Le tableau général qui termine ce chapitre pourra faciliter toutes les discussions auxquelles on peut se livrer sur ce grand problème de la figure de la terre. On y doit distinguer deux choses, qui sont véritablement très-distinctes, savoir : 1° les longueurs du pendule, d'où l'on peut déduire les intensités de la pesanteur aux différentes stations, ce qui est indépendant de toute hypothèse; et 2° les différences qui se trouvent entre ces résultats et ceux de la

théorie, ce qui est dépendant des hypothèses que la théorie porte avec elle.

56. *Déviation du fil à plomb par l'attraction des montagnes.* — Toutes les portions de la matière étant attirées l'une vers l'autre, on ne voit pas d'abord pourquoi de grandes masses, telles que des montagnes, n'exercent pas d'action sensible sur les corps qui les environnent. Pourquoi, par exemple, quand on laisse tomber une pierre du haut d'un sommet élevé, cette pierre, en tombant, ne se dirige pas vers le centre de la montagne qui est très-près, plutôt que vers le centre de la terre qui est très-loin. On peut même s'étonner que les murs d'un édifice ne produisent pas cet effet, et que, dans un appartement, un corps qui est suspendu en haut ne tombe pas sur le plafond plutôt que de tomber sur le plancher : à peu près comme aux antipodes, les corps tombent en remontant vers nous. Mais dès qu'on prend garde que la plus grosse montagne n'est qu'un grain de sable, quand on la compare à la terre, on ne s'étonne plus que les montagnes ordinaires ne puissent pas attirer à elles les corps que la terre attire elle-même. L'effet qu'elles pourraient produire serait tout au plus de les dévier un peu dans leur chute. Réciproquement, si elles peuvent produire quelques déviations, on pourra être assuré que la pesanteur est, comme nous l'avons dit, une force universelle qui agit sur toute la matière, et qu'il n'y a ni tourbillon autour de la terre, ni vertu particulière vers son centre, par quoi les corps soient poussés, ou sympathiquement précipités.

Bouguer est le premier qui eut l'idée de chercher, dans l'attraction des montagnes, une preuve de l'attraction universelle de la matière ; si elles agissent, elles doivent dévier le fil à plomb. Mais comment reconnaître si le fil à plomb est dévié ? la même cause qui changerait sa direction changerait aussi celle de la surface des eaux tranquilles, à laquelle on la rapporte ; et dès-lors on ne pourrait plus juger ni de l'un ni de l'autre changement. Aussi faut-il avoir

recours aux étoiles : c'est encore dans le ciel qu'il faut chercher une direction fixe pour les expériences de cette nature. C'est sur les flancs du Chimboraço, qui est une des plus grandes montagnes de la terre, que Bouguer fit son expérience. Il y rencontra des obstacles infinis, à cause de l'âpreté des lieux et des tempêtes terribles qu'il eut à essuyer dans ces hautes régions. Cependant il accomplit son dessein et trouva dans le fil à plomb une déviation de 7″ ou 8″. Ces montagnes volcaniques ont sans doute d'immenses cavités qui réduisent de beaucoup l'énergie de leur action.

Depuis Bouguer, on a répété les expériences en divers lieux : Maskeline, en 1772, les a surtout répétées avec de grandes précautions, au pied des monts Shéhalliens, en Ecosse, où il a trouvé une déviation de 54″. Il en résulte que certainement les montagnes agissent sur le fil à plomb, et qu'elles le dévient d'une quantité sensible, qui dépend de leur volume et de la nature des substances qui les composent. Maskeline avait fait ces expériences pour en déduire le rapport de la masse de la terre à celle de la montagne, et, par suite, la densité de la terre elle-même; il trouva de cette manière que la densité de la terre, prise dans son ensemble, est 4,56, ou à peu près quatre fois et demie la densité de l'eau. C'est, je crois, la première notion que l'on ait eue sur la nature des substances qui composent les couches centrales du globe.

57. En 1824, M. Carlini a fait des observations d'une autre espèce, qui l'ont conduit à peu près au même résultat. Il a observé le pendule au sommet du Mont-Cénis, et il a trouvé, pour sa longueur réduite au niveau de la mer, $993^{m},708$; ensuite, prenant la longueur du pendule de Bordeaux, déterminée par M. Biot, et la réduisant à la latitude du Mont-Cénis, il a trouvé 993,498. La différence est $0^{mm},210$, que M. Carlini attribue à l'action de la montagne. Le Mont-Cénis forme à peu près un segment de sphère, dont la base est la distance de Susa à Lanslebourg,

ou à peu près 11 milles géographiques, tandis que la *flèche* n'est que la onzième partie de cette distance ou un mille; d'après cela, on peut calculer son volume. Les substances qui le composent sont le marbre et le gypse, dont la densité moyenne est 2,66, ce qui permet de calculer sa masse. Avec ces élémens on peut comparer l'action de la montagne, dont on connaît le volume et la masse, à l'action de la terre, dont on ne connaît que le volume, et par conséquent on en peut tirer la densité moyenne de la terre. M. Carlini a trouvé qu'elle est de 4,39, résultat qui ne diffère guère du résultat précédent trouvé par Maskeline.

Le pendule que M. Carlini a employé était un pendule absolu, dont la boule était suspendue à la manière de Boscowich, et dont le couteau était remplacé par une petite rondelle d'acier, du poids de 19 grains, très-affilée sur ses bords, et par conséquent ne touchant le plan d'agate que par un seul point; les oscillations se faisaient perpendiculairement au plan de la rondelle.

58. Enfin, nous devons à Cavendish une autre détermination de la densité moyenne de la terre. Son appareil paraît être le plus exact que l'on puisse employer à cette recherche. La première idée de sa construction est due à Michell, de la Société royale de Londres : Michell n'ayant pas eu le temps d'achever ses expériences, et voyant sa fin approcher, légua son appareil à l'honorable *Francis-John-Hyde Wollaston*, professeur à Cambridge; et celui-ci, à son tour, en fit don à Cavendish, qui était déjà compté parmi les premiers physiciens de l'Angleterre. Voici l'idée principale sur laquelle repose ce procédé : si l'on avait une grande boule de métal de 10 pieds de rayon, il est clair qu'elle ne pourrait pas dévier le fil à plomb, puisque les montagnes ne le dévient que de quelques secondes; mais si au lieu d'un fil vertical sur lequel agit la pesanteur, on lui présentait au niveau de son centre, un levier horizon-

tal, bien équilibré et parfaitement mobile, il est clair qu'elle devrait l'attirer à elle et le faire tourner, puisque la pesanteur serait alors sans effet pour contrarier son action. Le levier horizontal serait donc une espèce de pendule, qui oscillerait par l'attraction de la boule, comme le pendule ordinaire oscille par l'action de la terre. Si même, au lieu d'une boule, on en mettait deux, agissant chacune sur l'une des extrémités du levier, on voit que l'effet serait doublé; ainsi, par ce moyen, en prenant des boules assez grosses et des leviers assez mobiles, on peut sans doute rendre sensible l'action de la matière sur la matière, et produire en petit, autour de ces sphères de métal, ce qui se produit en grand autour du globe de la terre.

L'appareil de Cavendish est représenté dans les *figures* 60 et 61. La *figure* 60 en représente la projection horizontale. S et S′ sont les deux sphères de métal; elles étaient en plomb et pesaient chacune $157^{k},925$. *abcd* représente la section d'une caisse dans laquelle on avait enfermé le levier mobile pour le garantir complètement de toutes les agitations de l'air. *s* et *s′* sont deux petites balles suspendues aux deux extrémités du levier mobile et parfaitement en équilibre.

La *figure* 61 est une coupe verticale, les mêmes lettres désignent les mêmes choses; on voit ici comment les deux petites balles sont suspendues par un fil d'argent qui traverse les extrémités du levier; ce fil vient en *n* s'attacher au fil vertical *ff′* dont la ténacité est assez grande pour porter le fléau et les balles *s* et *s′*, et dont la torsion est la seule force qui s'oppose aux oscillations. Les deux masses S et S′ sont elles-mêmes suspendues par des tiges de fer, et peuvent tourner autour de la caisse; elles passent successivement des positions S et S′ figurées en lignes pleines, aux positions S_{1}, S_{1}' figurées en lignes ponctuées: elles y sont conduites par une manœuvre qui s'exécute du dehors. Enfin tout l'appareil est enfermé dans une cham-

bre sans portes et sans fenêtres; il n'est éclairé que par une petite ouverture, au moyen d'une lampe F, placée en dehors des murs pour ne pas échauffer l'air intérieur; et c'est avec la lunette ll' que l'on observe les mouvemens qui se produisent.

Tout étant en repos et les masses S et S′ étant dans la situation où elles n'agissent pas, c'est-à-dire dans la situation perpendiculaire au levier mobile, on les fait tourner pour les mettre dans la situation de la *figure* 61, alors le levier se met à tourner, les petites balles s et s' sont attirées chacune vers la boule correspondante, et les oscillations commencent. C'est une preuve bien irrévocable que la matière attire la matière, et que les petites balles s et s' tendent à tomber sur les grandes sphères de plomb, par la même puissance qui les fait tomber sur la terre, et que s'il y a une différence elle provient seulement de la différence des masses. Ce fait fondamental une fois prouvé, il ne reste plus qu'à observer la durée des oscillations des petites balles, la longueur du levier à l'extrémité duquelle elles oscillent, et leur distance au centre des grandes sphères S et S′, qui peuvent être considérées comme les centres d'attraction. Ensuite, après avoir corrigé les résultats, des effets de la torsion du fil de suspension, l'on arrive à connaître l'effet d'une sphère de plomb du poids de $157^{k},925$, pour faire osciller un pendule simple d'une longueur connue, et placé à une distance connue de son centre. La question étant amenée à ce point, il n'y a plus que des proportions à faire pour avoir la masse de la terre, comparée à la masse du globe de plomb; car ces masses sont entre elles comme les longueurs des pendules simples qui battent la seconde, étant placés à une même distance de leur centre. Dans cette proportion tout est connu excepté la masse de la terre, que l'on peut par conséquent en déduire; on connaît d'ailleurs son volume par les mesures de l'arc du méridien, et en divisant la masse par le volume, on obtient

enfin sa densité moyenne. Pour dernier résultat de ces belles expériences, Cavendish trouve que la densité moyenne de la terre est de 5,48, c'est-à-dire à très-peu près cinq fois et demie la densité de l'eau.

Connaissant la densité de la terre et son volume, il est facile de trouver combien elle pèse de kilogrammes, ou plutôt combien de kilogrammes on trouverait, si l'on pouvait successivement prendre par petits fragmens, d'un mètre cube, par exemple, toutes les substances qui la composent pour les peser dans une balance, à Londres ou à Paris, et si l'on pouvait les remettre en place après les avoir pesées. Car, d'après ce que nous venons de voir sur l'attraction générale de la matière, nous pouvons être sûrs quand nous faisons une pesée, que toutes les molécules du globe contribuent à faire pencher la balance.

Par les observations et par les calculs astronomiques, on évalue les masses des planètes et celle du soleil au moyen de la masse de la terre; d'où il suit qu'avec le poids de la terre nous pouvons trouver le poids de toutes les planètes. Ainsi le petit appareil de Cavendish est une balance dans laquelle on peut peser le monde.

TABLEAU DES OBSERVATIONS DU PENDULE.

Élémens de Phys. de M. Pouillet. — Tome I, liv. 1, 1re partie, chap. 4, page 120.

STATIONS. (1)	LATITUDES Nord—N. Sud—S. (2)	LONGUEUR du PENDULE à la station. (3)	HAUTEUR de LA STATION au dessus du niveau de la mer, en mètres. (4)	LONGUEUR du PENDULE sexagésimal réduite au niveau de la mer. (5)	NOMS des OBSERVATEURS. (6)	AVANCE ou RETARD du pendule de Paris, transporté à chaque station réduite. (7)	LONGUEUR du PENDULE SEXAGÉSIMAL, calculé par l'ensemble de toutes les observations. (8)	AVANCE ou RETARD EN UN JOUR du pendule calculé sur le pendule observé. (9)	HAUTEUR à laquelle il faudrait placer le pendule, pour qu'il fût d'accord avec le pendule calculé. (10)
		lig.	m	mm					
Paris	48° 50′ 14″ N.	440,5593	70	993,8493	Borda		993,90017	— 2″30	+ 169
		mm							
Unst	60 45 25 N.	742,721034	9	994,9458	Biot	+ 46″9	994,88706	+ 2,56	— 188
Leith	55 58 37 N.	742,408533	21	994,5311	Biot	+ 28,8	994,50960	+ 0,92	— 68
Dunkerque	51 02 10 N.	742,07610	4	994,0802	Biot, Mathieu	+ 9,3	994,09189	— 0,50	+ 37
Paris	48 50 14 N.	741,90112	70	993,8666	Biot, Bouvard, Mathieu	00,0	993,90017	— 1,43	+ 105
Clermont	45 46 48 N.	741,61059	406	993,5822	Biot, Mathieu	— 12,4	993,63055	— 2,09	+ 154
Bordeaux	44 50 26 N.	741,60464	17	993,4530	Biot, Mathieu	— 18,0	993,54740	— 4,11	+ 302
Figeac	44 36 45 N.	741,56033	223	993,4578	Biot, Mathieu	— 17,8	993,52721	— 3,01	+ 222
Formentera	38 39 56 N.	741,20540	203	992,9760	Biot, Arago, Chaix	— 38,7	993,00533	— 1,27	+ 94
		p.							
Unst	60 45 28 N.	39,17145	9	994,9395	Kater	+ 46,6	994,88712	+ 2,28	— 168
Portsoy	57 40 59 N.	39,16140	29	994,6906	Kater	+ 35,8	994,64791	+ 1,86	— 137
Leith	55 58 41 N.	39,15540	21	994,5354	Kater	+ 29,1	994,50969	+ 1,13	— 83
Clifton	53 27 43 N.	39,14517	103	994,3018	Kater	+ 21,1	994,29972	+ 0,09	— 7
Arbury-Hill	52 12 55 N.	39,14057	225	994,2228	Kater	+ 15,5	994,19348	+ 1,28	— 94
London	51 31 08 N.	39,13908	28	994,1232	Kater	+ 11,1	994,13360	— 0,43	+ 32
Shanklin farm	50 37 24 N.	39,13551	74	994,0468	Kater	+ 7,8	994,05610	— 0,39	+ 29
Paris	48 50 14 N.	1,00000000	70	993,8666	Freycinet	00,0	993,90017	— 1,43	+ 105
Ile Mowi	20 52 07 N.	0,99792769	1,5	991,7850	Freycinet	— 90,5	991,66918	+ 5,06	— 373
Ile Guam	13 27 51 N.	0,99759268	2,0	991,4520	Freycinet	— 105,0	991,30053	+ 6,63	— 488
Ile Rawak	0 01 34 S.	0,99709528	1,5	990,9577	Freycinet	— 126,5	991,02557	— 2,92	+ 215
Ile-de-France	20 09 56 S.	0,99793729	15,5	991,7987	Freycinet	— 89,9	991,62832	+ 7,45	— 549
Rio-de-Janeïro	22 55 13 S.	0,99783413	5	991,6930	Freycinet	— 94,6	991,79483	— 4,39	+ 324
Port Jackson	33 51 34 S.	0,99876387	33,05	992,6260	Freycinet	— 54,0	992,60001	— 1,15	— 85
Cap de Bonne-Espérance	33 55 15 S.	0,99871111	15	992,5677	Freycinet	— 56,5	992,60504	— 1,59	+ 117
Iles Malouines	51 35 18 S.	1,00022130	6	994,0657	Freycinet	+ 8,6	994,13959	— 3,17	+ 234
Saint-Thomas	0 24 41 N.	39,02069	6	991,1094	Sabine	— 119,9	991,02583	+ 3,64	— 268
Maranham	2 31 43 S.	39,01197	23	990,8932	Sabine	— 129,4	991,03544	— 6,18	+ 455
Ascension	7 55 48 S.	39,02406	5	991,1948	Sabine	— 116,2	991,12211	+ 3,16	— 233
Sierra-Leone	8 29 28 N.	39,01954	55	991,0953	Sabine	— 120,7	991,13615	— 1,73	+ 128
Trinidad	10 38 56 N.	39,01879	6	991,0809	Sabine	— 122,1	991,19876	— 5,98	+ 440
Bahia	12 59 21 S.	39,02378	65	991,2064	Sabine	— 115,7	991,28180	— 3,28	+ 242
Jamaïca	17 56 07 N.	39,03508	3	991,4739	Sabine	— 104,1	991,50653	— 1,42	+ 104
New-York	40 42 43 N.	39,10153	20	993,1682	Sabine	— 30,4	993,18334	— 0,63	+ 46
London	51 31 08 N.	39,13908	28	994,1232	Sabine	+ 11,1	994,13360	— 0,43	+ 32
Drontheim	63 25 54 N.	39,17428	37	995,0200	Sabine	+ 50,1	995,08284	— 2,72	+ 200
Hammerfest	70 40 05 N.	39,19512	9	995,5405	Sabine	+ 72,7	995,54163	— 0,03	+ 2
Greenland	74 32 19 N.	39,20328	9	995,7478	Sabine	+ 81,7	995,73699	+ 0,50	— 37
Spitzberg	79 49 58 N.	39,21464	6	996,0356	Sabine	+ 94,2	995,93941	+ 4,19	— 309
Paris	48 50 14 N.	1,00000000	70	993,8673	Duperrey	00,0	993,90017	— 1,43	+ 105
Toulon	43 07 09 N.	0,99953725	3	993,3858	Duperrey	— 20,9	993,39514	— 0,40	+ 30
Ascension	07 55 09 S.	0,99731962	5	991,1824	Duperrey	— 116,8	991,12185	+ 2,63	— 194
Ile-de-France	20 09 19 S.	0,99790903	4,98	991,7682	Duperrey	— 91,3	991,62773	+ 6,11	— 450
Port Jackson	33 51 39 S.	0,99873358	6,08	992,5879	Duperrey	— 55,6	992,60012	— 0,53	+ 39
Iles Malouines	51 31 44 S.	1,00028461	6	994,1295	Duperrey	+ 11,4	994,13446	— 0,22	+ 16

OBSERVATIONS.

(3) Cette colonne contient les longueurs du pendule, telles qu'elles ont été données par les observateurs. Pour Borda, l'unité est la ligne; pour M. Biot, elle est le millimètre : mais son pendule est le pendule décimal; pour MM. Freycinet et Duperrey, l'unité est la longueur du pendule de Paris; pour MM. Kater et Sabine, l'unité est le pouce anglais.

(5) Cette colonne contient toutes les longueurs du pendule sexagésimal, exprimées en millimètres et réduites au niveau de la mer, par la formule ordinaire $\frac{2\,hl.}{r}$. Nous devions adopter le mode uniforme de réduction, pour discuter l'ensemble des observations.

(7) Il est curieux de connaître l'avance ou le retard qu'éprouverait en un jour moyen le pendule à secondes, de Paris, en le supposant transporté successivement sur la verticale de toutes les autres stations et au niveau de la mer. C'est ce qui est exprimé dans la colonne. Le signe + indique que le pendule de Paris serait en avance, et le signe — qu'il serait en retard.

(8) Cette colonne contient les longueurs du pendule à secondes, calculées par l'ensemble de toutes les observations, en les combinant par la méthode des moindres carrés, qui donne la formule

$$l = 0{,}99102557 + 0{,}00507188\ \sin^2\lambda.$$

(9) Cette colonne contient la différence qui a lieu en chaque station, entre les nombres d'oscillations que le pendule calculé et le pendule observé peuvent exécuter en un jour. On voit que ces différences sont en général assez petites, d'où il résulte que la courbure, calculée par l'ensemble des observations, représente chacune de ces observations d'une manière assez approchée. Cette courbure donne un aplatissement de $\frac{1}{289}$. La plus grande différence positive est 7″45 : elle correspond à l'Ile-de-France; c'est un fait très-remarquable, que les observations du capitaine Duperrey s'accordent, avec celles du capitaine Freycinet, à donner une différence aussi forte. S'il est permis de conclure quelque chose sur la forme de la terre au moyen des observations du pendule, il faudrait conclure qu'à l'Ile-de-France il y a dans le sol une densité locale très-considérable, ou une grande dépression de niveau. La plus grande différence négative est de —6″18; elle correspond à Maranham, qui offrirait, d'après les mêmes conséquences, un sol très-léger ou un niveau très-relevé, ou peut-être les deux circonstances à la fois. Le capitaine Sabine a, en effet, observé que Maranham est un terrain d'alluvion très-peu dense.

(10) Cette colonne contient la hauteur en mètres à laquelle s'élève en chaque lieu le niveau de la mer calculé au dessus du niveau réel, ou la profondeur à laquelle il s'enfonce. Ainsi, à l'Ile-de-France, la surface de la terre serait deprimée de 500 mètres, et à Maranham elle serait trop élevée de 455 mètres. Il résulte de cette discussion, 1°. que les observations du pendule réunies dans ce tableau offrent entre elles un accord remarquable, ce qui prouve que les observateurs ont atteint à un degré d'exactitude satisfaisant; 2° que l'aplatissement que l'on en peut déduire par la formule de Clairaut, est sensiblement plus grand que l'aplatissement $\frac{1}{305}$ donné par la théorie de la lune; 3° enfin, que la terre semble présenter en plusieurs de ses points de légères variations dans l'intensité de la pesanteur, qui tiennent sans doute à une action locale des couches de la superficie, ou à une irrégularité de forme, ou peut-être à ces deux circonstances réunies.

CHAPITRE V.

De l'Hydrostatique.

59. L'OBJET de l'hydrostatique est de déterminer les conditions d'équilibre des liquides, et les pressions qu'ils exercent sur les parois des vases qui les contiennent.

Les propriétés des liquides dépendent de deux forces : de la pesanteur qui agit sur eux comme sur tous les corps, et de l'attraction moléculaire qui agit sur eux d'une manière déterminée pour les constituer à l'état liquide. Nous pouvons distinguer par la pensée ce qui appartient à chacune de ces forces ; car nous pouvons imaginer une masse d'eau qui cesse un moment d'être pesante, sans pour cela cesser d'être liquide ; une telle masse ne pourrait plus ni tomber quand on l'abandonne, ni couler quand on la verse, et il est évident qu'elle n'aurait plus besoin pour être en repos, ni d'être soutenue sur le sol, ni d'être contenue dans un vase. Dans cet état, elle aurait encore un grand nombre de propriétés particulières qu'il serait curieux d'étudier, et parmi lesquelles la plus importante est celle qui est connue sous le nom de *Principe d'égalité de pression*.

60. *Principe d'égalité de pression.* Les liquides sont soumis au principe d'égalité de pression, c'est-à-dire qu'ils ont la propriété de transmettre dans tous les sens et également les pressions qu'on exerce à leur surface.

Ce principe est un axiome de physique ; mais s'il n'est pas nécessaire de le démontrer, il est au moins nécessaire de le faire comprendre. A B C D (*Fig.* 72) est un vase qui contient un liquide supposé sans pesanteur, P P′ est un

piston solide qui en couvre exactement toute la surface. Si le piston est aussi sans pesanteur, et s'il n'est chargé d'aucun poids, il est clair que le liquide n'éprouve aucune pression, et que l'on pourrait percer le vase sans qu'il s'écoulât; mais dès qu'on pose sur le piston un poids de 100 kilogrammes, par exemple, à l'instant il fait effort pour descendre, et descendrait en effet, si le liquide ne s'y opposait pas. Que le liquide soit compressible ou qu'il ne le soit pas du tout, le résultat est le même : il faut de toute nécessité qu'il s'anéantisse ou qu'il porte les 100 kilogrammes. La couche supérieure aa' qui touche au piston et qui le soutient, en supporte donc tout le poids; et, pressée comme elle est, elle tomberait nécessairement si elle n'était pas soutenue par la couche bb' qui est au dessous d'elle; elle presse sur cette couche autant qu'elle est elle-même pressée par le piston. De même la couche bb' presse sur la suivante cc', et ainsi de suite, la pression se communiquant de proche en proche jusqu'au fond du vase, qui est lui-même pressé comme si le piston reposait immédiatement sur lui. Puisque c'est toute la surface du fond qui porte cette pression de 100 kilogrammes, il est visible que la moitié de la surface ne porte pour sa part que 50 kilogrammes, et que la centième partie de sa surface ne porte que la centième partie de la pression totale, c'est-à-dire un seul kilogramme. Ainsi :

1°. La pression se transmet de haut en bas sur les surfaces horizontales sans rien perdre de sa force.

2°. Elle est égale en chaque point.

3°. Elle est proportionnelle à l'étendue de la surface que l'on considère.

Sur les faces latérales le même phénomène a lieu : car, si en un point quelconque on faisait une ouverture, le liquide jaillirait, et si l'on découpait une partie de la surface elle serait poussée dehors; enfin, si la portion que l'on découpe était égale à toute la largeur du piston, il ne faudrait

pas moins de 100 kilogrammes pour la tenir en place, et si elle n'avait qu'une étendue cent fois moindre, il ne faudrait qu'un effort d'un kilogramme. Si le piston lui-même était percé d'un trou, le liquide jaillirait de bas en haut, ce qui prouve que sa paroi est elle-même pressée comme le sont toutes les autres; ainsi les liquides transmettent dans tous les sens et également les pressions qu'on exerce à leur surface.

Après avoir compris ce principe pour des liquides sans pesanteur, il est facile de voir qu'il s'applique sans réserve aux liquides pesans, mais qu'alors il y a des pressions qui s'exercent sur chaque molécule, et qui résultent de la pesanteur qui leur est propre.

61. *De l'équilibre des liquides pesans.* Il y a deux conditions pour l'équilibre des liquides : il faut premièrement que les molécules supérieures et libres forment une surface perpendiculaire à la force qui les sollicite; et secondement qu'une molécule quelconque de la masse éprouve dans tous les sens des pressions égales et contraires.

Première condition d'équilibre. Supposons que la surface ne soit pas perpendiculaire à la force qui sollicite les molécules liquides, qu'elle soit par exemple dans la direction *abcde*, tandis que la force est dirigée suivant les verticales *vv* (*Fig.* 73). Alors une petite couche horizontale, telle que *bd*, serait pressée de tout le poids des molécules qui sont au dessus d'elle; cette pression, comme nous venons de le voir, se transmettrait latéralement, et la molécule *b*, poussée par cette pression latérale, serait poussée dehors, puisqu'il n'y a rien qui la retienne; elle sortirait donc: une autre viendrait, qui prendrait sa place, et qui serait poussée à son tour; et ainsi de suite, jusqu'à ce que la courbure *bcd* se fût affaissée, et fût devenue tout-à-fait horizontale. Il en arriverait de même de toute portion de liquide qui serait *au dessus* d'un autre point quelconque de la surface, et l'équilibre ne peut avoir lieu que

quand les molécules libres ne peuvent plus tomber, c'est-à-dire quand elles sont toutes rangées sur une même surface perpendiculaire à la force.

En appliquant ce principe à la surface de la mer, supposée parfaitement calme, il nous sera facile de prendre une idée de sa courbure et des causes qui la déterminent. Si toutes les directions de la pesanteur concouraient exactement au centre de la terre, et si cette force était la seule qui sollicitât les molécules liquides, il faudrait que dans tous les bassins de toutes les mers la surface libre des eaux prît la forme sphérique; car il n'y a que cette surface qui soit perpendiculaire à tous les rayons qui concourent en un point. Il faudrait de plus que toutes les plages fussent à la même distance du centre de la terre, car sans cela elles ne seraient pas au même niveau, et l'eau des plus élevées tomberait sur les plus basses.

C'est cette condition nécessaire de l'équilibe des masses fluides qui explique ce que nous avons annoncé dans le chapitre premier, sur la direction de la pesanteur; il faut bien que cette force soit perpendiculaire à la surface des eaux tranquilles, puisque c'est elle-même qui oblige les eaux à se ranger dans cette direction,

Quand les molécules liquides sont sollicitées par quelque autre force que par la pesanteur terrestre, on conçoit que pour l'équilibre elles ne doivent plus former une surface perpendiculaire à la pesanteur seulement, mais une surface perpendiculaire à la résultante de la pesanteur et de toutes les autres forces qui agissent avec elle. Ainsi, la force centrifuge, qui résulte du mouvement de rotation de la terre, se combinant sans cesse avec la pesanteur pour solliciter tous les corps, il faut que la surface des eaux s'arrange pour être perpendiculaire à la résultante de ces deux forces, et voilà pourquoi la surface de la mer est aplatie vers ses pôles. Au pied des grandes montagnes, dont la masse est capable de dévier le fil à plomb, la sur-

face des eaux est aussi déviée de sa forme régulière; elle se soulève et s'incline sur la véritable verticale, pour se mettre perpendiculaire à la résultante des actions de la terre et de la montagne. De même encore, quand la lune passe au dessus ou au dessous de l'horizon de la mer, la force attractive qu'elle exerce sur les eaux se combine avec la pesanteur pour produire une résultante qui n'est plus verticale; et c'est ainsi que la surface mobile de l'Océan, cherchant un équilibre qu'elle ne saurait trouver, à cause du mouvement de rotation de la lune, se soulève et se déprime tour à tour, et accomplit enfin les oscillations périodiques du flux et du reflux.

Il se présente dans la nature beaucoup d'autres phénomènes qui semblent n'avoir aucun rapport avec les marées, et qui dépendent cependant d'un principe analogue: on sait, par exemple, que dans un verre ordinaire la surface de l'eau n'est pas plane dans toute son étendue, mais qu'elle se relève près des bords, comme le représente la *figure* 74; au contraire, la surface du mercure se déprime au contact des parois et semble craindre de les toucher (*Fig.* 75). C'est que la pesanteur n'est pas alors la seule force qui agisse sur les liquides; avec elle il y a deux autres forces : la force attractive que leurs molécules propres exercent l'une sur l'autre, et la force attractive qu'elles exercent sur la matière du vase. C'est à la résultante de ces trois forces que la surface liquide doit être perpendiculaire, et c'est surtout du rapport d'énergie qui existe entre les deux dernières, que dépend l'inflexion qu'elle éprouve au dessus ou au dessous de la ligne de niveau. Nous verrons sortir de ce principe toute cette classe de phénomènes qui sont connus sous le nom de *phénomènes capillaires*, et dont nous devons traiter dans un des livres suivans.

62. *Pression sur les fonds des vases et sur leurs parois latérales.* Du principe de l'égalité de pression, et de la première condition d'équilibre, dont nous venons de par-

ler, résultent plusieurs conséquences tres-importantes.

1°. La pression qui s'exerce sur le fond d'un vase est égale au poids d'une colonne liquide, qui aurait pour base le fond lui-même, et pour hauteur, la hauteur du niveau; cette vérité est frappante quand le vase est cylindrique (*Fig.* 77). Les parois latérales n'éprouvant que des pressions perpendiculaires, ne sont alors poussées ni en haut ni en bas; elles ne peuvent donc ni décharger le fond ni le surcharger, et il faut qu'à lui seul il porte toute la charge, c'est-à-dire tout le poids du liquide contenu dans le vase. Au reste, on peut le prouver aussi par l'expérience : au fond du vase cylindrique ABCD (*Fig.* 76) est un piston mobile PP', qui peut être tiré de bas en haut par un fil assez fort; au sortir du vase ce fil passe sur des poulies, retombe verticalement, et porte à son extrémité un bassin de balance dans lequel on peut mettre des poids. D'abord on établit l'équilibre en chargeant le bassin jusqu'à ce que le piston commence à monter : cette charge est la mesure du frottement. Ensuite, ayant fixé le fil, on le charge des deux côtés; d'une part, en versant de l'eau dans le vase; de l'autre, en mettant dans le bassin un poids équivalent. Alors, laissant le fil à lui-même, on reconnaît que l'équilibre est établi, et qu'ainsi le piston est pressé ou poussé en bas par le poids de l'eau, autant qu'il est tiré en haut par le poids du bassin, qui est justement égal à celui de l'eau. Il ne faut qu'une goutte de liquide de plus pour le faire descendre, et un poids de plus pour le faire monter.

Il est évident que chaque portion du fond, que chaque centimètre carré, par exemple, porte pour sa part le poids de la colonne liquide, dont il est la base; et que la proposition dont il s'agit n'est pas seulement vraie pour le fond pris dans sa totalité, mais qu'elle est encore vraie pour une quelconque de ses parties.

On peut faire la même expérience avec un vase qui s'élargit (*Fig.* 78), ou avec un vase qui se rétrécit (*Fig.* 79):

on trouve toujours que la pression sur le fond est égale au poids de la colonne *cylindrique*, qui a pour base ce fond lui-même, et pour hauteur sa profondeur au dessous du niveau. Ainsi, dans le premier cas, la pression du fond est moindre que le poids total du liquide contenu dans le vase, et au contraire elle est plus grande dans le second cas. Ce dernier résultat a toujours quelque chose qui étonne au premier abord; on ne croit pas facilement que le liquide ABCD (*Fig.* 79) presse le fond du vase autant que le presserait ABRV. Mais, en y réfléchissant, on voit que le liquide qui serait contenu dans les parties latérales CAR et DBV ne pourrait contribuer en rien à presser sur le fond, pas plus que n'y contribuent les parties latérales CAR et DBV dans la *Fig.* 78.

Il en est de même, quelle que soit la forme du vase : pour avoir la pression sur une partie quelconque du fond; il faut toujours considérer la colonne cylindrique verticale, qui aurait pour base cette partie elle-même, et pour hauteur la hauteur du niveau. On a souvent besoin d'exprimer cette pression d'une manière générale : soit S la portion de surface horizontale que l'on considère, H, la hauteur de niveau au-dessus de cette surface, D, la densité du liquide; la pression sera exprimée par SHD : car SH est le volume de la colonne liquide, et, pour avoir le poids, il faut multiplier le volume par la densité.

Ainsi, avec un litre d'eau qui pèse un kilogramme, on peut exercer sur le fond d'un vase une pression très-petite, et l'on peut exercer aussi une pression infiniment grande. Pour que la pression soit d'un kilogramme, par exemple, il suffit de prendre un vase cylindrique de base quelconque, la pression totale sera toujours égale au poids du liquide, et par conséquent toujours un kilogramme; seulement la pression sur chaque centimètre carré du fond sera plus petite ou plus grande, suivant que le vase sera plus large ou plus étroit.

Pour que la pression soit de $\frac{1}{10}$ de kilogrammes, il suffit de prendre un vase dont la base soit par exemple un décimètre carré, et qui soit tellement évasé, que le litre d'eau n'y prenne que $\frac{1}{10}$ de décimètre, ou un centimètre de hauteur.

Pour que la pression soit de 10 kilogrammes, il suffit de prendre un vase dont la base soit par exemple d'un décimètre carré, mais tellement rétréci, que le litre d'eau y prenne une hauteur de 10 décimètres, ou d'un mètre.

Avec le même poids de 1 kilogramme, il serait tout aussi facile d'exercer une pression de $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$, etc. de kilogramme, ou une pression de 100, 1000, etc., kilogrammes.

Voici un autre appareil au moyen duquel on peut beaucoup plus facilement démontrer cette propriété fondamentale des liquides : il se compose d'un tube horizontal de fer ou de cuivre (*Fig.* 80), relevé perpendiculairement à ses deux extrémités. D'une part, il se termine par un réservoir de quelques pouces de largeur, sur lequel on peut visser des vases de toutes formes, ayant le même fond; de l'autre part, il se termine par un tube en verre de quelques lignes de diamètre, et sur lequel on peut faire glisser un index. On y verse du mercure, et le point où il s'arrête dans la petite branche est la première position de l'index; ensuite, après avoir vissé sur le réservoir un des vases que l'on veut soumettre à l'expérience, on le remplit d'eau jusqu'à une hauteur connue; la pression qui en résulte fait monter le mercure dans la petite branche, et on note le point où il s'arrête. Un second vase d'une toute autre forme est substitué au premier; on fait sur lui la même expérience, en y versant de l'eau jusqu'à la même hauteur, et l'on voit toujours que dans la petite branche le sommet de la colonne de mercure vient s'arrêter au même point. Donc, quelle que soit la forme des vases, les liquides qu'ils contiennent exercent la même pression sur leurs fonds, quand le niveau est le même. Cet ingénieux appareil est de l'invention de

M. de Haldat, professeur de physique et de médecine à Nancy; M. Legrand, élève distingué de l'École normale, avait eu aussi la même idée.

Ce n'est pas seulement sur les fonds des vases que s'exercent les pressions verticales des liquides; elles s'exercent encore sur tous les points de l'intérieur de la masse, et se communiquent de toutes parts en vertu du principe de l'égalité de pression; il en résulte un phénomène fondamental qu'il importe de faire comprendre. Concevons, dans l'intérieur de la masse liquide, une couche mm' (*Fig.* 81), qui soit parallèle à la surface de niveau nn': toutes les molécules qui composent cette couche sont évidemment pressées par tout ce qui est au dessus d'elles; elles sont comme si elles supportaient un piston d'un poids égal au poids du cylindre liquide $nn'mm'$. Seulement, cette pression qu'elle éprouve de haut en bas, se transmet de bas en haut par le principe d'égalité de pression, et chacune de ses molécules n'est en équilibre que par la simultanéité de ces pressions contraires. Ainsi, en ne considérant qu'une portion ab de cette couche, il faut bien comprendre que la surface ab est à la fois pressée de haut en bas par la colonne liquide $dabc$, et de bas en haut par une force exactement égale; tellement que, si un cylindre solide était plongé dans l'eau, et que sa base vînt s'appuyer sur la surface ab, cette pression de bas en haut agirait sur le cylindre et tendrait à le pousser dehors.

Cette conséquence se vérifie par l'expérience suivante: $vv'rr'$ (*Fig.* 82) est un tube de verre un peu épais, qui est bien *dressé* à son extrémité inférieure; tt' est un disque de verre dépoli, qui est pareillement plan, et qu'on appelle un *obturateur*; il est attaché par un fil qui passe dans le tube, en sorte qu'en tirant le fil l'obturateur vient fermer le tube; on le ferme ainsi et on le plonge dans l'eau. Alors il n'est plus nécessaire de tirer le fil pour empê-

cher que l'obturateur ne tombe, parce qu'il est repoussé en haut par toute la pression de bas en haut qui s'exerce sur sa surface; et cette pression est égale à celle qu'il supporterait de haut en bas s'il était seul plongé dans l'eau à la même profondeur. Pour en donner la preuve, on verse de l'eau dans le tube : dès que le niveau intérieur approche du niveau extérieur nn', l'obturateur est poussé de haut en bas, autant qu'il était repoussé de bas en haut, et l'on voit en effet qu'il tombe par son propre poids.

Ainsi, au fond d'un bateau, si l'on faisait une ouverture, l'eau jaillirait à l'instant, et pour l'empêcher d'entrer il faudrait exercer une pression qui fût égale au poids d'une colonne d'eau, ayant pour base l'ouverture, et pour hauteur la profondeur du bateau au dessous du niveau. C'est pour cela que, dans les grands vaisseaux, la quille doit avoir une grande force pour résister aux pressions de bas en haut qui s'exercent sur le fond du bâtiment. Si ce fond était horizontal, et qu'il eût par exemple 100 mètres carrés de superficie, la pression ne serait pas moindre que cent mille kilogrammes, quand le *tirant* serait d'un mètre, et que trois cent mille kilogrammes, quand il serait de trois mètres.

Nous pouvons juger par là des énormes pressions qui s'exercent dans les lacs et dans les mers, et de celles qui sont supportées par tous les élémens chimiques qui s'y trouvent, et par tous les corps vivans qui en peuplent les profondeurs. Nous reviendrons sur ce sujet dans le chapitre suivant.

2°. La pression que supporte une paroi latérale est égale au poids d'une colonne liquide qui aurait pour hauteur verticale la profondeur du centre de gravité de la paroi au dessous du niveau, et pour base horizontale une surface égale à la paroi elle-même.

Les pressions latérales se déduisent des pressions hori-

zontales correspondantes au moyen du principe d'égalité de pression : le point m (*Fig.* 81) faisant partie de la couche horizontale mm', cette couche lui transmet la pression qu'elle supporte elle-même; elle la transmet dans tous les sens, et par conséquent le point m la reçoit dans la direction perpendiculaire à la paroi dont il fait partie. Ainsi, chaque étendue d'une paroi latérale éprouve la même pression qu'une égale étendue de la couche horizontale qui lui correspond, c'est-à-dire que SHD représente aussi les pressions latérales : seulement la surface S doit toujours être assez étroite en hauteur pour que la pression soit sensiblement la même dans toute son étendue. Dans une cuve d'eau de 10 mètres de hauteur, la pression sur un centimètre carré de la paroi latérale est donc 100 grammes à 1 mètre de profondeur; elle est de 200 grammes à 2 mètres, et d'un kilogramme à 10 mètres, c'est-à-dire tout-à-fait au fond.

Pour avoir la somme des pressions latérales supportées par une paroi plane, qu'elle soit triangulaire, polygonale, ou de forme quelconque, on voit qu'il suffit de trouver la résultante d'un système de forces qui sont toutes parallèles, mais qui croissent proportionnellement à la profondeur, et aussi proportionnellement à l'étendue horizontale de la portion de paroi que l'on considère. C'est par cette composition de forces qu'on arrive, pour les pressions latérales, au théorême général que nous venons d'énoncer.

63. *Centre de pression.* — Le point d'application de la résultante de toutes les pressions élémentaires est ce qu'on appelle le *centre de pression;* il est toujours placé plus bas que le centre de gravité, puisqu'il coïnciderait avec lui, si les forces n'allaient pas en croissant à mesure que l'on descend. Dans une paroi qui a la forme d'un parallélogramme, le centre de pression est sur la ligne qui divise en deux parties égales les côtés horizontaux, et à $\frac{2}{3}$ de sa hauteur en partant du fond. Dans une paroi triangulaire dont la base

est au fond, il est au quart d'une ligne analogue, et au contraire, quand la base est à fleur d'eau, il est à moitié.

64. *Deuxième condition d'équilibre.* — La seconde condition d'équilibre est qu'une molécule quelconque de la masse éprouve dans tous les sens deux pressions égales et contraires. Il est évident que cette condition est nécessaire, et il n'est pas moins évident qu'elle est suffisante pour l'équilibre de l'intérieur, comme la première est suffisante pour l'équilibre de la surface. Essayons de donner un exemple qui en fasse mieux comprendre la nécessité. Supposons que dans le vase ABCD (*Fig.* 83), on eût arrangé, pour un moment, de l'eau et du mercure de telle sorte que les surfaces D*m* et *m*C fussent bien nivelées, et que la surface de jonction des deux liquides fût L*m*. La première condition d'équilibre serait remplie, et cependant l'équilibre n'aurait pas lieu; car au point *o*, par exemple, les pressions latérales et opposées ne seraient pas égales; celle du mercure étant la plus forte, les molécules de ce liquide tomberaient au fond et s'y mettraient de niveau. En général, divers liquides étant mêlés dans le même vase, ils s'arrangeront nécessairement de telle sorte, que chacun d'eux ait sa surface horizontale; c'est le seul arrangement qui puisse remplir la seconde condition d'équilibre. Ensuite il y aura stabilité, si les plus lourds sont en bas, suivant l'ordre de leur densité; mais s'ils n'y sont pas, on n'aura qu'un équilibre instable; au moindre choc les surfaces de jonction cesseront d'être planes, elles deviendront ondulées; les pressions ne seront plus égales dans tous les sens, et les liquides plus légers seront poussés en haut, tandis que les plus lourds viendront prendre la place qui convient à leur densité. C'est pour cela que de l'huile, battue avec de l'eau, s'en sépare avec le temps, et vient à la surface où l'appelle sa densité; et le même phénomène se reproduit dans tous les mélanges de liquides différens, lorsqu'il n'y a pas une

affinité chimique qui combine entre eux tous les élémens, et qui leur donne une densité commune.

65. *Vases communiquans.* — Lorsque plusieurs vases communiquent entre eux, quels que soient leur nombre et leur forme, les liquides qu'ils contiennent sont, pour l'équilibre, soumis aux deux conditions que nous venons d'établir, Ainsi, quand c'est le même liquide qui remplit tous les vases, il faut, par la première condition, que toutes les surfaces soient *de niveau*, et par la seconde, qu'elles soient *de même niveau*; car sans cela les couches de niveau de l'intérieur de la masse ne seraient pas également pressées dans toute leur étendue. En effet, dans le vase (*Fig.* 84), si le niveau de la grande branche était par exemple en ab, au lieu d'être en NN', sur la même ligne que nn', la couche de niveau $CC'cc'$ ne serait pas également pressée en CC' et en cc', et l'équilibre n'aurait pas lieu, puisqu'une couche de niveau quelconque doit toujours être également pressée dans toute son étendue.

Quand les liquides sont différens, il faut que les surfaces aient des niveaux différens.

Dans le vase représenté *figure* 85, il y a de l'eau dans la grande branche et du mercure dans la petite; les liquides se touchent en g, et on mène l'horizontale gh. Si les sections g et h n'avaient rien au dessus d'elles, l'équilibre aurait lieu; ainsi, pour l'équilibre, il faut que sur chaque point de leur étendue elles soient également pressées, l'une par l'eau, et l'autre par le mercure. Or une portion S de la section hg supporte une pression $S \times HD$, en désignant par H la hauteur de l'eau au dessus de g, et par D sa densité; de même, une égale portion de la section h supporte $S \times D'H'$, H' étant la hauteur du mercure au dessus de h, et D' sa densité. Il faut donc que l'on ait $S \times HD = S \times H'D'$, ou $\frac{H}{H'} = \frac{D'}{D}$; c'est-à-dire que les hauteurs au dessus du point de jonction des liquides sont entre elles en raison inverse des densités :

ainsi, un pouce de mercure fait équilibre à peu près à 14 pouces d'eau. La jonction des surfaces pourrait bien ne pas se faire sur une ligne horizontale, comme, par exemple, si on versait assez d'eau dans le vase pour refouler la colonne de mercure jusqu'en *s i*; mais alors on conçoit que dans cette section, si les pressions latérales sont égales, de chaque côté, sur les molécules qui sont au centre et dans l'axe du tube, elles ne peuvent plus l'être pour les molécules qui sont au dessus ou au dessous. Au bord supérieur en s, la pression de l'eau l'emporte, et au contraire au bord inférieur en *i*, c'est la pression du mercure; la surface de jonction tend à prendre la figure *s' i'*, et l'eau finit par passer dans la petite branche, et le mercure dans la grande, jusqu'à ce qu'enfin il s'établisse un autre équilibre.

Dans les tubes qui ont moins d'une ligne d'ouverture, cet effet ne se produit pas; les colonnes sont trop étroites pour se *diviser*, la cohésion des molécules de chaque liquide suffit pour résister à l'inégalité de pression qui existe entre le bord supérieur et le bord inférieur.

66. *Du niveau des mers.* — Les principes de l'hydrostatique ne trouvent pas seulement leur application dans les tubes et dans les vases étroits, sur lesquels nous pouvons expérimenter; mais ils s'appliquent pareillement à tous les liquides qui sont répandus dans la nature.

C'est par les lois précédentes, que toutes les eaux de la terre sont nivelées dans les bassins profonds de la mer, et que leur vaste surface conserve tout autour du globe une forme permanente; si elle est soulevée par les tempêtes, elle est ramenée par l'équilibre dans les limites qui lui sont assignées.

Si la terre était immobile et formée de couches homogènes, nous avons vu que la surface des mers serait rigoureusement sphérique; les navigateurs qui passent sous la ligne, ceux qui parcourent des plages inconnues, dans l'un ou dans l'autre hémisphère, et ceux qui visitent les côtes

du Groënland, où les mers encore plus voisines du pôle, se trouveraient tous en même temps à la même distance du centre de la terre; les choses seraient ainsi par les lois de l'hydrostatique, et par la structure des parties solides du globe, qui n'offrent à la surface que des saillies insensibles. De grandes inégalités dans les parties solides troubleraient la sphéricité des surfaces liquides : si la chaîne des Cordillières était seulement cent fois plus haute, les eaux seraient montantes sur les côtes de l'Amérique, vers l'Orient comme vers l'Occident; elles seraient descendantes sur les côtes opposées, et les ports de France seraient à sec, aussi bien que ceux du Japon.

Si la terre était immobile, et composée à l'extérieur de parties hétérogènes d'une densité très-inégale; si, par exemple, au dessous de l'Océan, entre la croûte qui lui sert de fond et le centre de la terre, il se trouvait d'immenses cavernes qui fussent vides ou remplies de substances de faible densité, il est clair que l'intensité de la pesanteur serait beaucoup moindre sur les eaux de l'Océan que sur celles des autres mers, et qu'alors la surface générale des eaux, au lieu d'être sphérique de toutes parts, devrait être renflée dans quelques endroits, et dans d'autres déprimée. Ainsi, une hétérogénéité de substances pourrait à elle seul produire des irrégularités de forme, et si à cette cause on ajoute l'influence de la force centrifuge, on voit que la question devient encore plus compliquée. Dans l'ignorance où nous sommes sur la composition intérieure du globe, dont, avec toute notre puissance, nous ne pouvons fouiller qu'une superficie d'une profondeur insensible, les seuls moyens que nous ayons de trouver la véritable forme de la surface des mers sont les opérations géodésiques et les observations du pendule. Par le premier moyen nous arriverons à la connaissance du fait, indépendamment de toute hypothèse et de toute explication; et par le second moyen, nous arriverons peut-être à découvrir quelques lois

générales de la structure intérieure de la terre, ou du moins quelques-unes des causes locales qui peuvent altérer la régularité de sa surface. L'équilibre des eaux dépend de la direction de la pesanteur, et les oscillations du pendule dépendent de l'intensité de la même force; il est difficile de démêler *à priori* jusqu'à quel point ces deux élémens sont liés entre eux, et jusqu'à quel point ils peuvent se déterminer l'un par l'autre; et c'est ce qui donne encore plus d'importance aux recherches qui ont pour objet de les déterminer avec exactitude.

Presque tous les bassins des mers communiquent de diverses manières, soit par de larges canaux, soit par des détroits plus ou moins resserrés; et les eaux dans ces différens bassins sont soumises aux conditions d'équilibre des vases communiquans. Seulement, il faut observer que l'eau de la mer n'est point un liquide homogène dans toute l'étendue de sa masse, la température change avec la latitude, et elle change aussi avec la profondeur; le degré de salure change pareillement; toutes ces causes font varier la densité dans les différens lieux, et de là il résulte une foule de mouvemens par lesquels l'équilibre tend à s'établir. L'eau de l'Océan afflue dans la mer Méditerranée par le détroit de Gibraltar; un courant rapide en est la preuve : mais on ne sait pas si par un courant contraire, qui aurait lieu à une plus grande profondeur, l'eau de la Méditerranée ne passe pas dans l'Océan. Si ce second courant existe, ils sont sans doute produits l'un et l'autre par la différence de densité des couches; s'il n'existe pas, il faut supposer que la Méditerranée perd par l'évaporation, ou par d'autres causes, plus d'eau qu'elle n'en reçoit par le Nil, le Rhône, le Danube, et tous les fleuves qui s'y jettent, et que l'Océan vient compenser cette perte pour la tenir à la hauteur voulue pour l'équilibre.

Voici les résultats qui ont été obtenus jusqu'à présent,

sur le nivellement des mers. Pendant l'expédition d'Égypte, une commission d'ingénieurs, sous la direction de M. Le Père, a déterminé les hauteurs relatives de la mer Rouge et de la mer Méditerranée. Cette opération mérite une assez grande confiance; et, pour résultat, elle donnne une différence de niveau très-remarquable entre ces deux mers, qui sont si voisines près de l'isthme de Suez et qui d'ailleurs communiquent par l'Océan. Aux mers basses la mer Rouge est encore élevée de $8^m,12$ au dessus de la mer Méditerranée, et dans les hautes mers son excès de hauteur s'élève à $9^m,9$. Ainsi se trouve confirmée l'opinion des anciens sur les dangers d'ouvrir une communication entre les deux mers. Aujourd'hui, une grande partie du sol de l'Égypte serait encore submergée par la mer Rouge, et cependant le lit du Nil et le sol de l'Egypte s'élèvent sans cesse par le dépôt de limon que laisse chaque inondation. M. Girard a fait de très-curieuses recherches sur ce sujet : en prenant la hauteur actuelle des crues, aux nilomètres d'Éléphantine et de l'île de Rondah, et en la comparant à ce qu'elle était autrefois, il trouve la mesure de l'exhaussement du sol, et il l'évalue à 126 millimètres par siècle. A ce compte, il faudrait encore bien des siècles pour que la Basse-Egypte fût seulement au niveau de la mer Rouge.

Dans l'opération de la méridienne de France, M. Delambre a calculé la hauteur de Rhodez au dessus du niveau de la mer Méditerranée à Barcelonne, et sa hauteur au dessus du niveau de l'Océan, qui baigne le pied de la tour de Dunkerque; ces deux hauteurs sont égales entre elles à une fraction de mètres près, d'où il suit que, s'il existe quelque différence de niveau entre la mer Méditerranée à Barcelonne, et l'Océan à Dunkerque, cette différence est du moins très-petite.

M. de Humboldt, dans son voyage en Amérique, a fait sur les côtes de l'Océan Atlantique et sur les côtes de la

mer du Sud, des observations du baromètre, d'où l'on peut tirer quelque connaissance sur la hauteur relative de ces deux mers. Des moyennes barométriques prises d'une part à Carthagène, à Cumana et à Vera-Cruz, sur la côte orientale du Mexique; et d'une autre part, au Callao et Acapulco, sur les bords de la mer du Sud, il résulterait que la mer du Sud serait plus élevée que l'Océan d'environ 7 mètres. D'autres observations de M. de Humboldt donneraient une différence un peu plus grande : mais ce célèbre voyageur ne donne les résultats précédens que comme une première approximation, supposant que les inégales hauteurs des marées, les heures différentes des établissemens des ports, et l'étendue plus ou moins grande des variations horaires du baromètre, sont autant de causes qui peuvent avoir une influence dans des mesures aussi délicates.

Le niveau de la mer Caspienne a été l'objet de plusieurs recherches récentes. Il a été déterminé, en 1815, par MM. d'Engelhardt et Parrot, dans leur curieux voyage au Caucase et en Crimée; il l'a été, en 1818, par M. Pansner; et vers cette même époque, M. Wisniewski a publié, dans les *Mémoires de Pétersbourg*, la série des observations qu'il avait faites dans le même but dès l'année 1812. Toutes ces mesures s'accordent à placer le niveau de la mer Caspienne de beaucoup au dessous du niveau de la mer Noire : d'après le résultat moyen, on peut estimer cette différence à 100 mètres ou à environ 300 pieds. Cependant près des bords de la mer Caspienne, et jusqu'à une grande distance de ses rivages actuels, on retrouve des preuves frappantes du séjour des eaux salées. La nature du sol, sa forme et sa composition chimique, les débris de coquilles et les squelettes de poissons dont il est rempli, ne semblent laisser aucun doute que la mer autrefois n'ait couvert toutes ces steppes, à plusieurs centaines de lieues de distance. Comment s'est produite la dépression

de niveau que l'on observe aujourd'hui ? Qu'est devenue cette masse d'eau qui manque et que l'on peut estimer à un volume de 30,000 lieues carrées de superficie sur une centaine de mètres de hauteur ? Voilà des problèmes dont on cherchera long-temps encore la solution; car ils tiennent à la géologie générale, et peut-être aux grandes catastrophes dont le Caucase a été le théâtre.

67. Le mélange des eaux des fleuves avec les eaux de la mer présente aussi quelques phénomènes d'hydrostatique qu'il est assez curieux d'observer. L'eau douce étant plus légère, doit se tenir à la surface, tandis que l'eau salée doit, par sa pesanteur, former les couches les plus profondes. C'est, en effet, ce que M. Stevenson a observé en 1816 dans le port d'Aberdeen, à l'embouchure de la Dee, et aussi de la Tamise, près de Londres et de Wolwich. En puisant de l'eau à diverses profondeurs avec un instrument imaginé pour cet objet, M. Stevenson a trouvé qu'à une certaine distance de l'embouchure, l'eau est douce dans toute la profondeur, même à la marée montante; mais que si l'on descend le cours de la rivière et que l'on approche un peu plus près de la mer, on trouve l'eau douce à la surface, tandis que l'eau de la mer forme les couches du fond. D'après ses observations, c'est entre Londres et Volwich que pour la Tamise la salure du fond commence à être sensible. Ainsi, au-dessous de Wolwich, cette rivière, au lieu de couler sur un fond solide, coule véritablement sur le fond liquide formé par les eaux de la mer, avec lesquelles sans doute elle se mêle plus ou moins. Cependant M. Stevenson est d'opinion qu'à la marée montante les eaux douces sont soulevées pour ainsi dire *tout d'une pièce* par les eaux salées qui affluent et qui remontent le lit du fleuve, tandis que l'eau douce continue de couler vers la mer.

Ces expériences tendent à confirmer l'opinion que Franklin avait émise sur ce sujet, dès l'année 1761. « Si quel-

ques rivières, dit-il, se rendent dans des lacs, sans que cependant ceux-ci débordent jamais, c'est que les eaux se répandent alors sous une surface tellement grande, que l'évaporation enlève journellement une masse de liquide à peu près égale à celle qui afflue; mais il est des fleuves qui, par l'étendue de leur cours et la largeur de leur embouchure, peuvent être assimilés à des lacs. Pour que la ressemblance fût parfaite, il suffirait qu'une digue arrêtât le cours des eaux et les empêchât de se rendre à la mer : on trouverait bien alors, suivant les saisons, quelques différences de niveau; mais on conçoit en général que, sous certaines circonstances, ces différences pourraient être renfermées dans des limites assez resserrées. Quoique la communication entre la rivière et la mer soit ouverte, on peut supposer que la digue dont nous venons de parler existe réellement dans la surface de jonction de l'eau douce et de l'eau salée. Seulement cette digue sera mobile; elle remontera d'un certain nombre de lieues à la marée montante, et redescendra ensuite : l'amplitude des excursions pourra varier avec le volume des eaux. Dans quelques cas, on devra aussi s'attendre à trouver que l'eau de la mer et celle de la rivière se mêlent en se rencontrant, et dans une étendue plus ou moins considérable, par le double effet de leurs mouvemens et de la différence des pesanteurs spécifiques; mais, à une certaine distance de l'embouchure, l'eau douce, d'abord entraînée par le courant et refoulée ensuite par la marée, oscillera à peu près dans les mêmes limites et sans jamais atteindre la mer. L'ignorant imaginerait que les eaux coulent et se perdent en partie sous quelques crevasses de la terre, tandis qu'en réalité c'est par l'air qu'elles s'échappent.

CHAPITRE VI.

De l'équilibre des gaz et des pressions atmosphériques.

68. L'AIR est un corps qui ne tombe pas immédiatement sous nos sens comme les corps solides ou les liquides; mais il se manifeste à nous par tant de phénomènes sur la terre et sur les eaux, qu'il n'est pas nécessaire de chercher d'autres preuves de son existence. Il y a des orages dans tous les climats et des tempêtes sur toutes les mers : ainsi le fluide de l'air enveloppe toute la surface du globe. Il forme partout une couche d'une grande épaisseur; car dans tous les pays, sur les montagnes, comme dans les plaines, on voit flotter des nuages qui sont emportés par le vent, et au dessus de ces nuages on voit la couleur brillante du ciel, qui est une preuve de la profondeur de l'air, comme la couleur de l'Océan est une preuve de la profondeur de l'eau. S'il n'y avait pas d'air, le ciel serait sans éclat et sans couleur; il paraîtrait comme une voûte absolument noire, où l'on verrait les astres briller pendant le jour avec le même éclat que pendant la nuit. Cette grande masse d'air, qui est répandue tout autour de la terre, et dont les couches superposées s'élèvent plus haut que les plus hautes montagnes, est ce que l'on nomme l'*atmosphère*. Le sommet le plus élevé de l'Himâlaya ne s'élève pas à deux lieues au dessus du niveau de la mer, et nous verrons que l'atmosphère s'élève à plus de douze à quinze lieues.

Les découvertes chimiques du dernier siècle nous ont fait connaître plusieurs corps, qui sont différens de l'air par leur nature, mais qui sont analogues à l'air par leur trans-

parence, par leur fluidité et par l'ensemble de leurs propriétés physiques. Tous ces corps ont reçu différens noms : d'abord on les appelait des *airs*, et l'on disait alors : *air méphitique, air inflammable, air hépatique, air fixe, air phlogistiqué, déphlogistiqué*, etc. ; aujourd'hui tous ces corps sont ce que l'on appelle les *gaz* ou les *corps gazeux* ou les *fluides élastiques*.

69. Les gaz sont soumis à deux espèces de forces, comme les solides et les liquides ; savoir : à la force de la pesanteur et aux forces moléculaires.

70. La pesanteur de l'air, qui avait été soupçonnée autrefois, même avant Aristote, n'a été véritablement démontrée qu'en 1640 par Galilée, et un peu plus tard elle a été confirmée par les belles expériences de Toricelli et par les expériences encore plus frappantes de Pascal. Cette vérité fondamentale peut se démontrer directement par l'expérience suivante : on fait le vide dans un grand ballon, au moyen de la machine pneumatique ; on le suspend à l'un des bras de la balance, et de l'autre côté on met des poids pour établir l'équilibre. Si après cela on ouvre un instant le robinet pour laisser rentrer un peu d'air, l'équilibre est rompu, la balance penche du côté du ballon, et il faut ajouter des poids dans l'autre bassin ; si l'on rouvre le robinet encore pendant un instant, il arrive encore une augmentation de poids ; et enfin, si on laisse rentrer l'air complètement, on trouve que pour rétablir l'équilibre il a fallu ajouter dans l'autre bassin une somme de poids très-sensible. Pour un ballon de 10 litres la différence des poids est de plus de 10 grammes ; ce qui prouve déjà, par une première approximation, que 1 litre d'air dans les circonstances ordinaires pèse un peu plus de 1 gramme, c'est-à-dire que l'eau n'est pas mille fois plus pesante que l'air ordinaire à Paris.

71. Les forces moléculaires agissent dans les gaz tout autrement que dans les solides et dans les liquides. Nous avons

vu que ces forces retiennent les molécules des solides fortement pressées les unes sur les autres, et fixement arrêtées à leur place; qu'elles retiennent aussi les molécules des liquides, tout en leur laissant une grande liberté de se mouvoir dans tous les sens; mais dans les gaz les forces moléculaires sont répulsives, et toutes les molécules, cédant à l'action de ces forces, tendent sans cesse à s'éloigner les unes des autres, et s'éloignent en effet jusqu'à ce qu'elles rencontrent des obstacles qui les arrêtent. Ainsi, l'air qui est renfermé dans un vase, fait sans cesse un effort contre les parois pour les presser et les repousser plus loin, et il faut toujours ou que les parois éclatent sous cette pression, ou qu'elles soient assez fortes pour y résister. Cette conséquence semble d'abord impossible, car s'il est vrai que dans un vase fermé, l'air fasse un tel effort contre les parois, il semble nécessaire que cet air s'échappe par la moindre ouverture, et qu'il s'échappe à plus forte raison à l'instant où l'on ouvre le vase, ou même avant que l'on ait eu le temps de le fermer. D'où il s'ensuivrait que tous les vases sont vides d'air, tandis que l'on sait bien qu'ils en sont tous remplis, à moins que l'on n'y verse de l'eau ou quelque autre liquide. Pour lever cette difficulté, imaginons un vase de 1 litre de capacité, par exemple, et fermé de toutes parts : s'il était vide et que l'on y fît une ouverture, l'air extérieur se précipiterait à l'instant pour le remplir; au contraire, s'il était plein, que l'on en perçât les parois et qu'il n'y eût pas d'air au dehors, l'air intérieur sortirait à l'instant; mais quand il y a de l'air au dehors comme au dedans, l'air extérieur fait pour entrer dans le vase autant d'effort que l'air intérieur pour en sortir, et, entre ces deux pressions égales, l'équilibre subsiste aux points où le vase est ouvert, comme aux points où il est fermé par des parois. C'est donc l'air extérieur qui arrête la force répulsive de l'air intérieur.

Cette propriété est si remarquable qu'il est bon de le démontrer par une expérience directe. Sous le récipient de

la machine pneumatique on met une vessie à moitié pleine d'air, on donne quelques coups de piston, et on voit la vessie qui se gonfle de plus en plus jusqu'à prendre tout le volume dont elle est susceptible; elle se tend comme si on y soufflait de l'air avec une grande force. On voit donc que l'air intérieur qu'elle contient faisait un effort pour repousser les parois, puisqu'il les repousse en effet, dès que, par le jeu de la machine, on enlève l'air du récipient qui arrêtait cet effort. Au lieu d'une vessie on pourrait mettre sous le récipient un vase de verre très-mince, fermé par un bouchon; alors en faisant le vide comme tout à l'heure, on verrait sauter le bouchon ou bien peut-être le vase se briserait. Cette pression, que l'air exerce contre les parois des vases qui le contiennent, est ce que l'on nomme *son élasticité* ou *sa force élastique*, ou *sa tension*.

Un ressort ne devient élastique que quand on le comprime, et il perd sa tension dès qu'il est revenu à son état primitif; mais l'air est toujours dans un état actuel de tension; il n'y a point pour lui de volume primitif, puisqu'il tend sans cesse à occuper un volume plus grand. Un litre d'air ordinaire serait versé dans un espace vide, de plusieurs milliers de mètres cubes de capacité, qu'il se répandrait partout dans cet espace, et qu'il en presserait les parois dans tous les sens, faisant encore un effort pour se répandre plus au large. On conçoit d'après cela combien il importe d'étudier les effets de l'air atmosphérique, car sa seule présence est une force active dans tous les phénomènes que nous observons.

72. *Conditions d'équilibre de l'air.* — Il n'y a pour les gaz qu'une seule condition d'équilibre; savoir, que leur force élastique soit la même dans toute l'étendue d'une couche de niveau. Cette condition est analogue à la seconde condition d'équilibre des liquides (64), et elle se déduit des mêmes principes : savoir, de la mobilité de molécules et de l'action de la pesanteur qui s'exerce sur elles. Dans un vase

quelconque (*Fig.* 86) tous les points de la couche horizontale cc' doivent avoir la même élasticité, car il faut que la force répulsive des molécules qui sont en b, puisse arrêter la force répulsive des molécules qui sont en b'; et ces forces ne peuvent s'arrêter et se faire équilibre, à moins qu'elles ne soient égales dans tous les points de la couche horizontale cc'. Il en est de même dans toutes les sections de niveau que l'on peut concevoir, soit au dessus, soit au dessous de cc'; mais il est évident que la couche mm', par exemple, est plus pressée que cc', puisqu'elle supporte d'abord toute la pression qui s'exerce en cc', et qui lui est transmise par le principe d'égalité de pression; et qu'en outre elle supporte encore tout le poids de l'air qui est compris dans la colonne $cmm'c'$ et qui pèse librement sur elle comme une colonne d'eau pèse sur le fond d'un vase.

Les conditions de la stabilité et de l'instabilité de l'équilibre sont aussi les mêmes que dans les liquides, et pour les mêmes raisons; l'équilibre est stable quand la densité de l'air inférieur est plus grande que celle de l'air supérieur, et il est instable quand le contraire a lieu. Mais l'équilibre instable, quoique mathématiquement possible, est toujours physiquement impossible, à cause de la grande mobilité des molécules des gaz.

Cette loi de l'équilibre de l'air est une loi universelle pour toutes les masses gazeuses, quelque petites ou quelque grandes qu'elles puissent être. Elle s'applique à l'air contenu dans un grand édifice comme à celui qui est contenu dans un vase de petites dimensions; elle s'applique à toute la colonne d'air atmosphérique qui repose sur une vaste plaine, et elle s'applique enfin à la masse entière de l'air qui constitue l'atmosphère. Que l'on conçoive à une hauteur quelconque, à la hauteur du Mont-Blanc, par exemple, une couche atmosphérique qui enveloppe la terre, et qui soit parallèle à la surface des eaux, il faudra pour l'équilibre que tous les points de cette couche sup-

portent partout la même pression, à Paris comme aux antipodes, sur les continens comme sur les mers, et dans les régions des pôles comme dans celles de l'équateur. Une seconde couche parallèle à celle-là, mais qui serait à cent mètres au dessous, devrait, par la même raison, avoir tous ses points également pressés entre eux, et tous se trouveraient plus pressés que ceux de la première couche, du poids entier de la colonne d'air de cent mètres qu'ils supportent de plus. Ainsi, à hauteur égale, la pression doit être égale, mais elle diminue à mesure que l'on s'élève. La nécessité d'une pression uniforme dans une si grande étendue fait assez comprendre que dans l'océan de l'air tout équilibre est impossible. Un calme universel est incompatible avec tant de mobilité, puisqu'un seul point ébranlé met toute la masse en agitation.

Les gaz ne peuvent pas, comme les liquides, avoir une surface libre sur laquelle aucune pression ne soit exercée; car nous avons dit qu'il faut un obstacle pour arrêter leur force expansive, qui est indéfinie. D'après cela, on pourrait conclure que l'atmosphère n'est pas bornée à douze ou quinze lieues, comme on le dit communément, puisqu'à cette limite les molécules de l'air toujours poussées par leur force élastique, et ne trouvant rien qui les arrêtât, se précipiteraient dans le vide et se dissiperaient de plus en plus, jusqu'à remplir enfin toute l'immense étendue des cieux. Ainsi l'air serait partout; il envelopperait la lune comme la terre, il envelopperait le soleil et les planètes; et il formerait autour de ces astres des atmosphères analogues à l'atmosphère terrestre. Nous démontrerons en optique que les phénomènes observés ne justifient point ces conclusions; et sans expliquer à présent les causes probables qui retiennent les molécules de l'air, nous adopterons l'opinion que notre atmosphère est limitée et qu'elle n'a en effet que douze ou quinze lieues d'étendue. Au delà est le vide; la dernière couche de l'atmosphère est la dernière limite de la masse pondérable de la terre.

73. *De la pression de l'air.* — Les conditions générales de l'équilibre étant une fois posées, nous pouvons constater, par des expériences directes, que toutes les couches inférieures de l'air sont en effet pressés par les couches supérieures, et qu'elles le sont diversement suivant la hauteur à laquelle on s'élève au dessus du niveau de la mer.

Expérience du crève-vessie. — On met sur la platine de la machine pneumatique une espèce de manchon de verre (*Fig.* 87), dont les parois sont très-épaisses, et qui est fermé à sa partie supérieure par une membrane de vessie, très-bien tendue et fortement arrêtée sur ses bords. Cette membrane éprouve, d'une part, la pression de l'air extérieur qui tend à l'abaisser, et de l'autre, la pression de l'air intérieur qui tend à la soulever, de telle sorte qu'elle reste en équilibre entre ces deux pressions opposées. Si par quelque moyen on soufflait dans le vase une nouvelle quantité d'air, la pression intérieure deviendrait la plus forte, et la membrane se renflerait en dehors; au contraire, si on enlève de l'air, la pression intérieure deviendra plus faible, et la membrane, cédant à la pression extérieure, devra fléchir et s'enfoncer en dedans. C'est là l'effet qu'on obtient en faisant jouer la machine pneumatique, car elle aspire peu à peu tout l'air qui est contenu dans le vase : dès les premiers coups de piston, on voit la membrane fléchir sous la pression extérieure, puis elle fléchit de plus en plus; enfin quand le vide est fait, on voit qu'elle est très-tendue, et par conséquent très-pressée. On peut juger qu'un poids de 100 kilogrammes, qui serait posé sur elle, lui donnerait moins de tension. Alors, si l'on donne avec le doigt un coup, même très-léger, au milieu de la membrane, elle éclate en mille pièces, et l'on entend une explosion plus forte qu'un coup de pistolet, tant est grande la pression de l'air extérieur, et l'effort qu'il fait pour rentrer dans le vase; car c'est en rentrant avec impétuosité qu'il produit tant de bruit.

Au lieu d'une pression de haut en bas, on aurait une

pression latérale, si le crève-vessie était incliné, ou une pression de bas en haut, s'il était renversé; toutes ces pressions ne produiraient pas moins d'effet que la première, ce qui prouve bien que l'air presse dans tous les sens, ou que les pressions se transmettent et deviennent aussi des pressions de bas en haut, comme il arrive dans les liquides.

Cette expérience semble d'abord très-étonnante; on ne comprend pas comment l'air d'un appartement peut exercer une pression si prodigieuse. Il faudrait qu'il fût bien pesant s'il n'agissait que par sa pesanteur, car une colonne d'eau qui aurait toute la hauteur de l'appartement serait bien loin de produire un tel effet. C'est qu'aussi il y a une autre cause. Supposons, pour un moment, que l'expérience ait été faite en plein air; alors, d'après les principes de l'hydrostatique, la pression serait égale au poids de la colonne d'air, ayant pour base la largeur de la membrane, et pour hauteur, non pas un mètre, ni dix mètres, ni cent mètres, mais toute la hauteur de l'atmosphère; dix lieues si l'atmosphère a dix lieues, cent lieues si l'atmosphère en a cent. Puisque sur une même couche de niveau les pressions sont toujours égales, on voit que dans un appartement la pression qui s'exerce sur le crève-vessie est aussi toute la pression atmosphérique.

En mesurant cette pression, qui fait éclater avec tant de bruit la membrane du crève-vessie, on aurait tout le poids d'une colonne d'air qui s'élève aussi haut que l'atmosphère peut s'étendre. De même qu'un physicien pourrait, au fond de la mer, avec un appareil semblable, trouver le poids total de la colonne d'eau qui s'éleverait au dessus de sa tête.

74. *Mesure de la pression atmosphérique.* — Puisque l'atmosphère enveloppe la terre, elle en presse tous les points, comme elle presse la membrane du crève-vessie; elle presse également toute la surface des continens et toute la surface des eaux, soit dans l'immense étendue des mers,

soit dans les lacs, soit dans les vases qui servent à nos expériences.

Supposons qu'un tube plonge par une de ses extrémités dans un vase rempli d'eau (*Fig.* 88) : le liquide se met au même niveau dans le tube et dans le vase, parce que la pression atmosphérique est la même, dans l'intérieur du tube en nn', et au dehors sur la suface NN'. Mais si on aspire une partie de l'air contenu dans le tube, le liquide monte comme s'il était lui-même aspiré; il monte de plus en plus à mesure que l'aspiration continue, il s'arrête quand elle cesse, et la colonne soulevée reste suspendue dans l'intérieur du tube. Cette expérience, qui n'est qu'un jeu d'enfant, va nous donner le moyen de mesurer la pression atmosphérique, et de trouver le poids total de l'air, comme si nous pouvions mettre tout l'atmosphère dans une balance. En aspirant l'air, on diminue la pression qui s'exerce à l'intérieur du tube, sans rien changer à la pression extérieure : celle-ci étant alors la plus forte, elle force le liquide à monter, jusqu'à ce que la condition d'équilibre soit remplie, c'est-à-dire jusqu'à ce que la pression soit la même sur toute la couche de niveau, aussi bien à l'intérieur en nn' qu'à l'extérieur en NN'. Au moment où ces pressions sont égales le liquide cesse de monter; mais la pression intérieure qui s'exerce sur nn' se compose de deux parties : de la pression due au poids de la colonne soulevée, et de la pression due à l'élasticité de l'air qui reste au-dessus du sommet de cette colonne. Ainsi, en diminuant de plus en plus l'élasticité de l'air, l'eau intérieure doit s'élever de plus en plus, et enfin, si l'on épuise l'air complètement, il faudra qu'elle s'élève à tel point qu'à elle seule elle presse sur nn' autant que l'atmosphère presse au dehors sur NN'; il faudra donc que le poids de cette colonne d'eau soit égal au poids d'une colonne d'air de même base, ayant pour hauteur toute la hauteur de l'atmosphère; car, sur chaque centimètre carré de surface, l'air et l'eau ne pressent que par leur

poids. Voilà donc le moyen de peser une colonne atmosphérique, quelle que soit la hauteur à laquelle elle puisse s'élever; tout se réduit à trouver un tube assez long, et à épuiser l'air assez complètement. Pascal en fit l'expérience à Rouen, en 1646; son tube avait 46 pieds de long, et pour s'éviter la peine d'en épuiser l'air peu à peu, ce qui aurait été impossible en ce temps-là, il le fit sceller à un bout, le remplit de vin, et ferma l'autre bout avec un bouchon. Alors, par le moyen de cordes et de poulies, le tube fut redressé verticalement, et l'extrémité inférieure fut plongée dans un vase d'eau; au moment où l'on enleva le bouchon qui la fermait, toute la colonne liquide s'abaissa dans le tube jusqu'à ce que son sommet fût à environ 32 pieds au dessus du niveau de l'eau du vase. Dans les 14 pieds qui étaient au dessus, il n'y avait point d'air, c'était le vide; ainsi, la colonne liquide faisait à elle seule équilibre à la pression atmosphérique; d'où il suit qu'une colonne d'eau ou de vin de 32 pieds de hauteur pèse autant qu'une colonne d'air de même base. Ainsi, chaque point de la surface de la terre est pressé comme s'il était recouvert d'une couche d'eau de 32 pieds de hauteur; et nous, qui vivons au fond de l'océan de l'air, nous sommes pressés de toutes parts comme si nous étions au fond d'un lac, avec 32 pieds d'eau au dessus de nos têtes.

C'est à des fontainiers de Florence que nous devons le premier germe de cette découverte. Ayant eu l'occasion de faire un corps de pompe qui avait plus de 32 pieds de hauteur, ils virent, avec grande surprise, que l'eau ne voulait pas monter jusqu'à son sommet. A cette époque, on expliquait l'ascension des liquides, en disant que la nature avait *horreur du vide*, et qu'elle y poussait les liquides pour le remplir. Les explications par *les causes occultes* n'étaient pas de celles dont Galilée pût se contenter; aussi, dès qu'il eut connaissance du fait observé par les fontainiers, il supposa que la pesanteur de l'air en était la véri-

table cause. Toricelli, son disciple, en donna la preuve la plus décisive; voici à peu près son raisonnement : pour exercer des pressions égales, les colonnes liquides doivent avoir des hauteurs qui soient en raison inverse de leur densité; donc, un liquide qui peserait une fois plus que l'eau, ferait équilibre à l'atmosphère avec une colonne de 16 pieds, et le mercure, qui pèse à peu près quatorze fois plus que l'eau, doit faire équilibre avec une colonne qui est la quatorzième partie de 32 pieds, ou environ 28 pouces. C'est une conséquence facile à vérifier : on prend un tube de verre d'une trentaine de pouces, fermé par un bout; on le remplit de mercure, et ensuite, après l'avoir bouché avec le doigt, on le retourne verticalement pour en plonger l'extrémité dans une cuvette remplie de même liquide (*Fig.* 90). Aussitôt qu'on enlève le doigt, la colonne intérieure descend de quelques pouces, puis elle s'arrête; l'équilibre est établi, et le petit filet de mercure qui reste suspendu dans le tube est une balance qui donne le poids de l'atmosphère. Cet appareil est le *baromètre*; la colonne d'eau de Pascal était un véritable baromètre à eau. Le vide qui est au dessus de la colonne barométrique s'appelle le *vide barométrique* ou *le vide de Torricelli*.

Nous pouvons à présent mettre une grande exactitude dans nos résultats. La *hauteur* du baromètre est la hauteur verticale du sommet *ss'* (*Fig.* 90), au dessus du niveau NN'; elle n'est pas la même dans tous les lieux, mais sur les bords de la mer elle est ordinairement de 76 centimètres. Ainsi, pour un centimètre de base, la colonne soulevée a un volume de 76 centimètres cubes; et son poids, qui est égal au volume multiplié par la densité, est par conséquent de $76 \times 13{,}59$, ou de 1^k, 033, car la densité du mercure est de 13,59. La colonne d'air atmosphérique qui repose sur la mer et qui a un centimètre de base, a donc dans toute sa hauteur un poids de 1^k, 033; on peut même pousser plus loin le calcul, et trouver le poids de la masse entière de

l'air qui compose l'atmosphère, car autant il y a de centimètres carrés dans la surface de la terre, autant il y a de fois $1^k,033$ dans le poids total de l'air. Le rayon du globe étant de 6366745 mètres, sa surface est d'environ 100 mille myriamètres; sur chaque myriamètre le poids est d'un million de millions de tonnes, de chacune mille kilogrammes; ainsi, le poids total de l'air est de cent mille millions de millions de tonnes. Voilà donc le poids total de l'air, des vapeurs, et des exhalaisons de toutes sortes qui composent l'atmosphère. Il sera curieux d'examiner, comme nous le ferons plus tard, si cette masse de substances gazeuses éprouve des variations accidentelles, ou des variations séculaires, et si elle a sensiblement changé depuis que Toricelli et Pascal l'ont pesée pour la première fois.

75. *Construction du baromètre.* — On donne à cet instrument des formes différentes suivant l'usage auquel on le destine; mais il y a quelques conditions générales d'exactitude qu'il faut toujours remplir, quelle que soit la forme que l'on adopte.

1° Il faut que le mercure soit très-pur, parce que sa densité s'altère avec sa pureté.

2° Quand la colonne monte ou descend dans l'intérieur du tube, la surface extérieure s'abaisse ou s'élève, et il faut disposer l'appareil pour qu'on puisse à chaque instant mesurer la hauteur du baromètre, c'est-à-dire la hauteur verticale du niveau intérieur au dessus du niveau extérieur.

3° Il faut que le vide soit parfait au dessus du sommet de la colonne barométrique; car s'il restait un peu d'air dans cet espace, ou s'il y avait quelques vapeurs, ce serait une force élastique qui agirait sans cesse pour repousser le mercure, et qui l'empêcherait de monter à son vrai niveau.

Pour obtenir le vide aussi exactement qu'il est possible, on fait bouillir le mercure de la manière suivante (*Fig.* 89): On remplit le tube au tiers de sa longueur, et on le fait

bouillir à plusieurs reprises dans toute cette étendue; ensuite on verse une nouvelle quantité de mercure qui soit un peu chaud, pour ne pas faire éclater le tube, et on recommence l'ébullition dans toute la longueur de cette nouvelle colonne; on ajoute ainsi de nouvelles quantités de mercure, que l'on fait successivement bouillir jusqu'à ce qu'enfin l'ébullition ait parcouru toute la longueur du tube ou à très-peu près; alors on achève de le remplir avec du mercure bouilli, et le baromètre est terminé. Cependant il est bon de vérifier si par le retournement on n'aurait pas laissé entrer quelques bulles d'air; il faut pour cela incliner le tube un peu vivement pour que le mercure vienne en frapper le sommet; s'il donne un coup sec, on peut espérer que le vide est assez bien fait, sinon l'opération est certainement manquée.

Quand toutes ces conditions sont remplies, il y a encore, en général, deux corrections à faire pour avoir la hauteur du baromètre : l'une est relative à *la capillarité*, et l'autre à *la température*, à laquelle se trouve le mercure au moment de l'observation. Le sommet de la colonne barométrique est arrondi par la capillarité, et en même temps il est retenu par elle à une hauteur d'autant moindre que le tube est plus étroit. Nous donnerons dans la météorologie les tables nécessaires pour faire les corrections qui dépendent de cette cause; mais nous pouvons dès à présent faire remarquer que dans certains baromètres le sommet de la colonne est loin d'être convexe, comme il devrait être : quelquefois il est plan, quelquefois même il est concave; Don Casbois avait observé ce fait, et on en avait donné diverses explications; mais M. Dulong a fait voir que ce phénomène singulier tient à un oxide de mercure qui se forme pendant l'ébullition, et qui se dissout dans le reste de la masse. Il faut donc avoir grand soin de ne pas faire bouillir le mercure au contact de l'air, car les corrections de la capillarité supposent essentiellement que la colonne prend

toute la convexité qu'elle doit prendre. Nous donnerons pareillement des tables de correction pour la température, et l'on conçoit combien elles sont importantes, puisque le mercure, en se dilatant, devient de plus en plus léger, et que par cette cause la colonne peut être trop haute de plusieurs millimètres.

On distingue deux sortes de baromètres : les *baromètres à siphon* et *les baromètres à cuvette*. Les premiers sont ceux dont le tube est recourbé à sa partie inférieure en forme de siphon (*Fig.* 91), tandis que dans les derniers le tube est tout droit, et plonge par son extrémité dans une cuvette plus ou moins large (*Fig.* 90).

76. *Le baromètre ordinaire* est un baromètre à siphon (*Fig.* 95), porté sur une monture en bois; *l'échelle des hauteurs* est ordinairement en métal; le *zéro* de sa division est fixe, et se trouve au niveau du mercure de la courte branche; ce niveau changeant quand le baromètre change, il en résulte des erreurs d'autant plus grandes que la courte branche est plus étroite.

77. *Le baromètre à robinet* (*Fig.* 90 *bis*) est un baromètre à siphon, qui porte à sa partie inférieure une garniture en fer et un robinet de même métal. Pour transporter cet instrument on l'incline d'abord, de manière que la branche fermée se remplisse complétement de mercure; alors on ferme le robinet, et on a moins à craindre que l'air puisse pénétrer dans le tube par les secousses du voyage.

78. *Le baromètre à cadran* est un baromètre à siphon, dont le mécanisme est représenté (*Fig.* 97). Une poulie mobile, faisant partie de la monture, porte, au moyen d'un fil de soie, deux petits poids qui ne sont pas tout-à-fait égaux : le plus lourd tombe sur la surface du mercure et partage tous ses mouvemens ; il monte quand elle monte, et descend quand elle descend : le plus léger fait l'office de contre-poids, en sorte que la poulie est toujours entraînée, tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre ; en

même temps l'aiguille qu'elle porte parcourt les divisions du cadran, et marque, selon le préjugé, le beau, le variable ou la tempête. On s'arrange pour que les variations les plus extrêmes du baromètre ne puissent pas faire parcourir à l'aiguille plus d'une révolution du cadran; car elle passerait alors sur une même division pour deux hauteurs différentes, et le baromètre dirait deux fois la même chose dans deux circonstances très-différentes, ce qui ne serait pas le moyen de dire toujours la vérité. Habituellement on met la tempête au dessus du cadran, et le beau fixe dans le bas, le variable prend sa place au milieu; on préfère ce baromètre quand on recherche l'agrément, mais on ne s'en sert jamais quand on veut de l'exactitude.

79. Parmi les baromètre à siphon, il y en a un qui réunit tout les avantages, soit pour l'exactitude de ses indications, soit pour la facilité avec laquelle ou peut le transporter dans les voyages les plus difficiles : c'est le baromètre de M. Gay-Lussac. Comme il est sans robinet, sans piston, sans bouchon même, on peut faire une observation en moins d'une minute. « Pour mieux faire concevoir ce qui caractérise ce baromètre, dit M. Gay-Lussac, je le supposerai dépouillé de sa monture, qu'on peut varier d'ailleurs d'une infinité de manières. La *figure* 91 représente le tube barométrique dans sa situation propre à l'observation. N*n* sont les deux niveaux du mercure; la grande branche AB est d'un égal diamètre jusqu'en F. En ce point le tube AF est soudé avec un autre tube FBC, fort, en verre, dont le diamètre intérieur doit être de 1 à 2 millimètres. La petite branche CD du baromètre doit avoir le même diamètre que la partie NF de la grande. Elle est fermée en D; mais en E, à la distance de 2 à 3 centimètres de D, se trouve un petit trou capillaire par lequel le mercure ne peut point s'échapper à moins d'une pression très-grande, et qui néanmoins permet à l'air d'entrer dans la cuvette et d'en sortir librement.

» La *figure* 92 représente le baromètre renversé ; le mercure occupe la partie CBFA du tube, et l'excédant est logé en D. Il convient que cet excédant soit nul ou au moins très-petit. On fait sortir très-aisément le mercure en tenant la branche CD horizontalement, le trou E en dessous ; le mercure étant au dessus du trou, on dilate l'air en chauffant la branche CD, et le mercure est alors expulsé. Si au contraire on veut faire rentrer du mercure dans le baromètre, on le plonge dans la situation où le représente la *figure* 91, dans un bain de mercure jusqu'au dessus du trou E, et on incline le tube. L'air étant alors dilaté dans la branche CD, le mercure y rentrera, pourvu que la perte de l'élasticité de l'air soit plus grande que la longueur de la colonne dont le mercure s'abaisserait dans un tube dont le diamètre serait égal à celui du trou. J'ai supposé ici que le baromètre n'avait d'autre ouverture que le trou capillaire E; mais il est bien plus facile de régler le baromètre pendant qu'il est ouvert en D.

» La figure 93 représente le baromètre dans la même position que la *figure* 92, avec cette différence seulement que la branche BFA est supposée vide de mercure depuis B jusqu'en G; ce qui peut arriver en imprimant au baromètre des secousses violentes. Dans ce cas, l'instrument ne pourrait plus servir si le tube CBGF avait un diamètre aussi grand que le tube AF, parce qu'en renversant l'instrument, l'air contenu en BG monterait nécessairement dans sa partie supérieure; mais si le tube CBGF n'a au plus que 2 millimètres, comme je l'ai indiqué, la colonne GF du mercure ne pourra pas être divisée par l'air, et celui-ci sera expulsé par la chute du mercure lorsqu'on retournera le baromètre. Il arrivera même quelquefois que la colonne GA restera suspendue, quoique plus grande que la pression barométrique; mais en donnant une légère secousse à l'instrument, de haut en bas, la colonne tombera aussitôt, et l'air contenu en BG sera chassé.

» Il y a donc deux choses qui caractérisent le nouveau baromètre; 1°. le petit trou capillaire E, qui laisse une libre circulation à l'air, et empêche cependant le mercure de sortir; 2°. le tube CBF d'un diamètre assez étroit pour que l'air ne puisse pas diviser la colonne de mercure, comme cela a lieu dans l'ingénieux baromètre conique d'Amontons.

» En construisant ce baromètre il faut que l'artiste ait l'attention de ne point porter d'huile dans la branche BCD, soit en la fermant en D, soit en faisant le petit trou E. J'ai déjà dit que c'est l'huile ou tout autre corps gras qui est la cause de la poudre noire ou de la crasse qui se forme dans les baromètres, quand le mercure est d'ailleurs bien pur, et on ne saurait l'exclure avec trop de soin. J'ai fait faire plus de cinq cents lieues à mon baromètre; M. Descotils, dans un voyage en Italie, lui en a fait faire plus de douze cents, et je puis affirmer que le mercure était aussi net que le premier jour, malgré les secousses continuelles auxquelles il a été exposé dans une chaise de poste.....

» On voit aisément pourquoi l'axe du tube AF n'est pas dans le prolongement de celui du tube FB; c'est afin que le centre de gravité de l'instrument soit sur cet axe lorsque l'instrument sera suspendu librement en A (*Fig.* 94).....

» Le transport de ce baromètre est très-facile, et il ne pourra se déranger si l'on a l'attention de le tenir renversé, comme l'indiquent la figure 92, ou au moins incliné sous un angle de quinze à trente degrés. J'ai annoncé qu'il ne fallait pas plus d'une minute pour l'observer; et, en effet, il suffit de le renverser pour qu'il se prête immédiatement à l'observation.

» On peut le monter de beaucoup de manières; par exemple, le mettre dans une canne fendue dans toute sa longueur, et qui s'ouvre à charnière (*Fig.* 94); mais je préfère l'enfermer dans un tube creux de métal, fendu dans une partie de sa longueur, et recouvert par un autre tube

qui peut glisser longitudinalement ou tourner à léger frottement sur le premier. Si l'on adopte cette dernière construction, le tube extérieur doit aussi être fendu pour laisser voir la colonne de mercure ou la cacher, suivant que les fentes des deux tubes seront ou ne seront pas appliquées l'une sur l'autre.

» On peut encore, si l'on veut avoir un instrument peu dispendieux, tracer les divisions sur le verre même, et enfermer le tube barométrique dans un tube de fer-blanc qui s'ouvre à ses deux extrémités. Il n'est pas alors nécessaire de se servir d'un vernier, parce que les divisions étant près du mercure, on évite facilement l'effet de la parallaxe, et on peut, avec un peu d'habitude, évaluer avec l'œil $\frac{1}{8}$ et même $\frac{1}{10}$ de millimètre, pour vu que l'on observe l'origine de la courbe du mercure. Enfin, si l'on voulait se conserver la facilité de nettoyer le tube CD, dans la crainte que le mercure ne se ternît à la longue, on pourrait se contenter de le fermer en D avec une peau ou avec un liége.

» La manière de se servir du nouveau baromètre ne présente aucune difficulté; on observe la hauteur de la colonne inférieure et celle de la colonne supérieure, et on les retranche l'une de l'autre. Si les deux branches sont d'un égal diamètre, il suffira d'observer la hauteur de la colonne supérieure, et de doubler les variations apparentes pour avoir les variations réelles. Lors même que les deux branches n'auraient pas un égal diamètre, on pourrait encore se contenter d'une seule observation, pourvu que l'on connût les vraies différences de niveau de centimètre en centimètre, parce que dans l'intervalle on pourrait regarder, sans erreur sensible, les deux branches comme ayant le même diamètre. Cet avantage, commun à tous les baromètres à siphon, est très-précieux pour les voyages géodésiques; car on fait d'autant plus d'observations qu'elles sont plus faciles à faire. »

Un jeune artiste, M. Bunten, a fait au baromètre de

M. Gay-Lussac un léger changement qui paraît offrir quelques avantages; il suffit, pour en prendre une idée, de jeter les yeux sur la *figure* 91 *bis*. On voit que l'air qui tendrait à monter dans le vide barométrique serait arrêté en B.

80. *Baromètre de Fortin.* — Le baromètre de Fortin (*Fig.* 96) est un baromètre à cuvette; ce qui le distingue, c'est qu'il est à niveau fixe. Ce niveau est marqué par l'extrémité d'une pointe d'ivoire. La cuvette a un fond mobile; il suffit de tourner la vis V dans un sens ou dans l'autre pour faire monter le niveau ou pour le faire descendre; en même temps qu'on la tourne on observe l'image de la pointe d'ivoire qui se réfléchit sur la surface brillante du mercure, et il est facile d'amener le niveau exactement en contact avec l'extrémité de la pointe. C'est par là qu'on commence toutes les observations. Le tube de métal qui enveloppe le tube de verre est fendu des deux côtés vers sa partie supérieure, et il porte des divisions qui sont comptées de l'extrémité même de la pointe, de telle sorte qu'il suffit de diriger par les deux fentes un rayon visuel, qui rase la surface de la colonne, et de voir à quelle division il correspond. Pour éviter les erreurs que l'on pourrait commettre en s'écartant au dessus ou au dessous de la ligne horizontale, il y a un curseur qui glisse sur le tube de métal, et qui n'est fendu que dans une petite partie de sa longueur; la fente qui est en avant et celle qui est derrière, se terminent par deux plans de même niveau, perpendiculaires à la longueur du tube. On abaisse le curseur jusqu'à ce que le rayon visuel qui rase ces plans rase pareillement le sommet de la colonne; alors il suffit de voir à quelle division du tube correspondent les plans, ce qui est très-facile, parce qu'ils forment le *zéro* du nonius du curseur. De cette manière on peut avoir la hauteur du baromètre à moins de $\frac{1}{20}$ de millimètre.

81. *Variations du Baromètre.* — Nous ne savons rien de ce qui se passe dans les hautes régions de l'air; ici, à la

surface de la terre, nous observons des changemens de température, tantôt périodiques, tantôt brusques et inattendus; nous observons des vents et des orages, mais nous ne pouvons juger des secousses atmosphériques que jusqu'à la hauteur où l'agitation des nuages nous en permet l'observation. Au moyen du baromètre nous serons instruits de ce qui se passe dans toute la hauteur de l'atmosphère; car il nous donne à chaque instant le poids de la colonne d'air, et c'est exactement comme si nous avions toute cette colonne en équilibre dans une balance.

On présume bien d'après cela que dans un même lieu le baromètre ne reste pas stationnaire dans le cours d'une année, et qu'il éprouve des variations plus ou moins considérables. Et en effet, à Paris, par exemple, il n'y a presque pas de jours où il ne change de plusieurs millimètres. En général on distingue deux espèces de variations dans le baromètre, les variations *accidentelles* et les variations *horaires;* celles-ci se reproduisent très-régulièrement à des heures marquées, et sont d'une grandeur constante; les autres surviennent irrégulièrement sans qu'on en puisse prévoir ni l'époque ni l'étendue.

82. *Hauteurs moyennes.* — Comme les variations ne sont jamais très-promptes, si on observait le baromètre d'heure en heure, vingt-quatre fois dans la journée, qu'on ajoutât les vingt-quatre hauteurs observées, et qu'on en prît la vingt-quatrième partie, on aurait très-exactement la *hauteur moyenne du jour;* car on aurait le même résultat que si l'on eût observé de demi-heure en demi-heure, ou même de minute en minute. Mais on conçoit que s'il fallait essentiellement passer par les vingt-quatre observations pour avoir la hauteur moyenne d'un jour, il faudrait, quelle qu'en soit l'importance, désespérer d'y arriver jamais. Quel observateur pourrait s'assujettir pendant des années entières à une régularité aussi minutieuse et aussi mécanique?

C'est sans doute pour cette raison que l'on a été si longtemps avant de savoir trouver des moyennes qui pussent servir à quelque chose : tantôt on ajoutait la hauteur *maximum* et la hauteur *minimum*, et on en prenait la moitié, tantôt on employait de la même manière les hauteurs du lever du soleil et celles de deux heures, tantôt on faisait d'autres combinaisons qui n'étaient ni moins arbitraires ni moins inexactes. Enfin M. de La Place a donné la théorie complète de l'équilibre barométrique ; et plusieurs grands observateurs, à la tête desquels on doit placer M. Ramond et M. de Humboldt, nous ont appris tout ce qu'on pouvait tirer du baromètre, soit pour la météorologie, soit pour les grands nivellemens géographiques. M. Ramond, dans l'excellent ouvrage qu'il a publié sur ce sujet, a fait voir, par une longue suite d'expériences, qu'il existe une heure de la journée où la hauteur du baromètre est très-sensiblement la hauteur moyenne du jour. Cette heure est, dans nos climats, l'heure de midi : ainsi on est dispensé de faire vingt-quatre observations dans la journée ; que l'on en fasse une seule avec exactitude à l'heure de midi, et l'on aura la hauteur que l'on cherche. On conçoit qu'en ajoutant les trente hauteurs moyennes des trente jours du mois, et prenant le trentième de la somme, on aura la *hauteur moyenne du mois ;* et qu'en traitant de même les douze moyennes des douze mois, on aura enfin la *hauteur moyenne de l'année.* Ce résultat est fondamental et très-important à connaître pour chaque lieu de la terre ; mais M. Ramond a encore démontré que dans nos climats le phénomène curieux des variations horaires ne peut ni se démêler, ni se mesurer exactement, à moins qu'on ne détermine encore les moyennes mensuelles et annuelles qui correspondent à certaines heures de la journée. C'est pour cela que les observateurs qui veulent concourir d'une manière utile au progrès de la science observent régulièrement le baromètre quatre fois par jour,

et aux heures précises de 9 heures du matin, de midi, de 3 heures du soir et de 9 heures du soir.

A Paris, la hauteur moyenne n'est pas la même pour toutes les années, mais les variations qu'elle éprouve ne sont pas considérables; en dix années, de 1816 à 1825, la plus grande différence n'est pas de quatre millimètres; voici le tableau des résultats.

ANNÉES.	HAUTEUR moyenne.	MINIMUM.	MAXIMUM.	DIFFÉRENCE.
	millimètres.	millimètres.	millimètres.	millimètres.
1816	754,161	730,57	772,76	42,19
1817	756,400	730,61	772,92	42,31
1818	756,063	733,78	771,49	37,71
1819	755,103	738,56	772,45	33,89
1820	756,002	733,19	769,67	36,48
1821	756,065	719,03	780,89	61,86
1822	757,472	737,18	771,46	34,28
1823	754,969	723,05	772,30	49,25
1824	755,750	728,87	773,45	44,58
1825	757,679	728,63	776,46	47,83
Moyenne des 10 années.	755,966	730,35	773,38	43,04

Ainsi, à Paris, la hauteur moyenne de dix années est à très-peu près 756 millimètres.

La moyenne des hauteurs minimum est de $730^{mm}35$; la moyenne des hauteurs maximum de 773,38; enfin la moyenne oscillation de l'année est de 43,04, c'est-à-dire qu'à Paris c'est dans une longueur de 43,04 que s'accomplissent en général toutes les variations barométriques de l'année.

83. *Variations accidentelles.* — En chaque lieu le baromètre est en oscillation continuelle au dessus et au dessous de la moyenne de l'année, et quelquefois il éprouve des

secousses qui le font tomber de beaucoup au dessous; à Paris, il descend assez fréquemment jusqu'à 740. On voit par le tableau précédent qu'il est descendu à 730, à 728, à 723, et qu'en décembre 1821 il est tombé à 719,03; c'est la plus grande dépression qui ait été observée à Paris depuis 1785; car c'est de cette époque seulement que l'on fait à l'Observatoire une série régulière d'observations météorologiques avec des instrumens qui méritent confiance. On voit que le baromètre éprouve aussi des ascensions assez considérables; il atteint assez fréquemment à 770; et en février 1821, il s'est élevé jusqu'à près de 781. Il est remarquable que les deux variations extrêmes qui ont eu lieu dans le cours de dix années soient à des époques si rapprochées l'une de l'autre, et que l'année où elles se trouvent ne donne en dernier résultat qu'une moyenne tout-à-fait ordinaire. De 719,03 à 780,89, la différence est 61^{mm},86, ou à peu près 28 lignes; ainsi, dans dix ans, le baromètre à Paris a éprouvé des oscillations extrêmes d'autant de lignes qu'il y a de pouces dans sa hauteur ordinaire.

Les variations du baromètre indiquent un changement présent dans l'atmosphère; beaucoup de personnes pensent qu'elles annoncent aussi un changement futur, et qu'il suffit de savoir bien consulter le baromètre pour prédire à coup sûr la pluie ou le beau temps plusieurs jours à l'avance; c'est une question de météorologie que nous examinerons plus tard. Mais il n'est peut-être pas inutile de donner ici le tableau des pressions différentes que supporte une surface de 1 mètre carré, suivant les hauteurs du baromètre.

HAUTEUR du baromètre en millimèt.	PRESSION sur un mètre carré en kilogr.	HAUTEUR du baromètre en millimèt.	PRESSION sur un mètre carré en kilogr.	HAUTEUR du baromètre en millimèt.	PRESSION sur un mètre carré en kilogr.
500mm	6793k	600mm	8152k	700mm	9510k
510	6929	610	8287	710	9646
520	7065	620	8423	720	9782
530	7201	630	8559	730	9918
540	7336	640	8695	740	10054
550	7472	650	8831	750	10189
560	7608	660	8967	760	10325
570	7744	670	9103	770	10461
580	7880	680	9238	780	10597
590	8016	690	9374	790	10733

On voit que, le baromètre étant à 780, une surface de 1 mètre carré supporte 10597 kilogr., et que cette énorme charge se réduit à 9782 kilogr. quand le baromètre tombe à 720; ainsi, la surface entière de notre corps étant à peu près de 1 mètre carré, nous sommes dans ces circonstances soulagés d'un poids de 815 kilogr. Une cause aussi puissante exerce nécessairement une influence sur les fonctions physiologiques, et surtout sur les phénomènes de la respiration et de la circulation, mais ses effets sont en général si compliqués qu'il faudra sans doute de longues expériences pour parvenir à les démêler.

La hauteur de 600 millimètres est à peu près celle qui a lieu au dessus du Mont-d'Or et à la poste du Mont-Cénis; un voyageur qui part du niveau de la mer pour s'élever sur ces montagnes est soulagé d'un poids de 2173 kilogrammes, et il est soulagé de 3539 kilogrammes lorsqu'il arrive en un lieu où le baromètre marque seulement 500 millimètres; c'est à peu près sa hauteur ordinaire sur l'Etna et sur le Mont Liban. On sait tout ce que les voyageurs racontent des sensations extraordinaires que l'on éprouve au

sommet des hautes montagnes où le baromètre ne marque plus que 400 ou 500 millimètres. On voit de toutes parts un immense horizon, on est soulagé d'un pesant fardeau, on ne respire qu'un air pur et léger, et il semble en effet que l'on ne touche plus à terre.

Les variations accidentelles du baromètre n'ont pas la même étendue dans tous les climats, ni à toutes les hauteurs; les limites entre lesquelles elles se produisent sont en général d'autant plus écartées l'une de l'autre, que la latitude est plus grande. Dès 1690 le père De Bèze avait reconnu qu'à Pondichéry et à Batavia le baromètre reste immobile, quelles que soient les tempêtes que l'on éprouve; Legentil avait fait plus tard la même observation aux mêmes lieux, et maintenant il est bien démontré que dans toute la zône équatoriale, le baromètre est en effet insensible à toutes les grandes secousses atmosphériques, mais qu'il éprouve cependant des variations périodiques et régulières, que l'on appelle variations horaires.

84. C'est vers l'année 1722 que les *variations horaires* du baromètre furent constatées d'une manière certaine par les observations d'un Hollandais, dont le nom reste inconnu. Depuis cette époque, plusieurs observateurs ont essayé d'en déterminer l'étendue et les périodes pour différens lieux de la terre. M. de Humboldt a démontré, par de longues séries d'observations très-précieuses, que sous l'équateur le *maximum* de hauteur correspond à 9 heures du matin; passé 9 heures le baromètre descend jusqu'à 4 heures, ou même $4^{h}.\frac{1}{2}$ de l'après-midi, où il atteint son *minimum*; ensuite il remonte jusqu'à 11 heures du soir, où il arrive à un second *maximum*, et il redescend enfin jusqu'à 4 heures du matin. Ainsi, chaque jour il passe par les deux *minimum* de 4 heures du matin et de 4 heures du soir, et par les deux *maximum* de 9 heures du matin et de 11 heures du soir. Les mouvemens de dépression et d'ascension sont si réguliers, qu'ils pourraient servir à marquer les heures,

comme les mouvemens de l'horloge. Seulement, ils ont peu d'amplitude; car ils s'accomplissent dans une longueur que M. de Humboldt évalue à deux millimètres depuis le point le plus haut du matin jusqu'au point le plus bas de l'après-midi.

Dans nos climats, ces variations horaires sont tellement dissimulées par les variations accidentelles, qu'il fallait, pour les découvrir et pour les mesurer, toute la sagacité et toute la précision d'un observateur tel que M. Ramond. Ce n'est que par les moyennes de plusieurs mois d'observations prises avec exactitude et aux heures convenables, que l'on peut trouver les périodes horaires. M. Ramond a reconnu que leurs époques varient avec les saisons. En hiver, le *maximum* est à 9 heures du matin, le *minimum* à 3 heures de l'après-midi, et le second *maximum* à 9 heures du soir.

En été, le *maximum* a lieu avant 8 heures du matin, le *minimum* à 4 heures de l'après-midi, et le second *maximum* à 11 heures du soir.

Au printemps et en automne, les heures *critiques* sont intermédiaires, se rapprochant plus ou moins de celles de l'été ou de celles de l'hiver. L'étendue absolue des variations est un peu moindre qu'à l'équateur. Dans les latitudes les plus élevées, il faut comparer et discuter un plus grand nombre d'observations pour en faire sortir les périodes horaires; et, sur ce point, la science a beaucoup à désirer; cependant en traitant de la météorologie, nous discuterons tous les résultats importans des observations barométriques, et nous verrons aussi les nombreuses applications du baromètre.

85. *Loi de Mariotte.* — La loi de Mariotte est la loi de la compressibilité des fluides élastiques; elle exprime le *rapport* qui existe entre les volumes et les pressions. Ce rapport est très-simple : les *volumes des gaz sont en raison inverse des pressions qu'ils supportent.* Pour démontrer par l'expérience cette vérité fondamentale, on prend un tube

recourbé (*Fig.* 98), dont la courte branche est cylindrique, et fermée à son extrémité, et dont la longue branche reste ouverte pour recevoir la pression atmosphérique. On y verse du mercure, d'abord en petite quantité; et en inclinant le tube pour faire sortir une partie de l'air de la courte branche, on arrive facilement à mettre le mercure au même niveau dans les deux branches. Alors, l'air enfermé dans l'espace *ab* se trouve exactement sous la pression atmosphérique; et si, à partir de ce point, on le force à se resserrer dans la moitié, le tiers, ou le quart de la longueur *ab*, on aura réduit son volume à la moitié, au tiers, ou au quart de ce qu'il est, à cause que le tube est cylindrique. Pour cela, on verse du mercure par la branche ouverte, et on en verse jusqu'à ce que le sommet de la petite colonne soit parvenu au point *m*, milieu de la longueur *ab*; ce point *m*, et le point *n* qui lui correspond dans la grande branche, supportent l'un et l'autre la même pression, puisqu'ils sont au même niveau; cette pression est de deux atmosphères, car elle se compose du poids de la colonne *ns*, que l'on trouve toujours égale en hauteur à la colonne barométrique, et de la pression atmosphérique elle-même qui s'exerce encore au sommet de la colonne. Donc, il a fallu une pression double pour réduire à moitié le volume de l'air contenu dans la courte branche. En donnant à l'appareil une branche ouverte beaucoup plus longue, on démontre de la même manière qu'il faut une pression de trois atmosphères pour réduire le volume au tiers, et de quatre atmosphères pour le réduire au quart de ce qu'il était sous une seule pression atmosphérique. Cette loi, découverte par Mariotte en France, et à peu près à la même époque par Boyle en Angleterre, a été depuis confirmée de plusieurs manières, soit pour des pressions moindres que la pression atmosphérique, soit pour des pressions de plusieurs atmosphères. On a démontré aussi qu'entre ces limites elle s'applique à tous les gaz.

Cependant, au delà de ces limites, la loi de Mariotte

restait incertaine; on ne pouvait l'appliquer avec confiance ni pour les recherches théoriques ni pour les applications. MM. Arago et Dulong, chargés par l'Académie des Sciences, en 1828, de déterminer les tensions de la vapeur d'eau dans les températures élevées, ont commencé par chercher la loi de compressibilité de l'air, et ils ont poussé leurs expériences jusqu'à la pression de 27 atmosphères. Nous devons essayer de donner ici une idée de ce travail, qui est l'un des plus importans et des plus remarquables qui aient été entrepris dans ces derniers temps.

Les appareils avaient été établis au collége Henri IV dans une vieille tour carrée, au centre de laquelle on avait pu facilement élever un mât en bois d'une centaine de pieds de hauteur. Au pied du mât était un fort vase en fonte avec un manomètre et une pompe foulante, et contre sa hauteur un tube vertical en verre de 75 à 80 pieds de longueur (il était composé de 13 tubes de 6 pieds mis bout à bout).

On prendra une idée de cette disposition en jetant les yeux sur la *figure* 228, *planche* 10.

VV′ est le vase en fonte,

P la pompe foulante,

MM′ le manomètre, fermé à son extrémité supérieure;

TT′ le tube vertical, ouvert en haut, et

AA′ le mât contre lequel il s'élève.

Si l'on suppose 1° que le vase en fonte contienne du mercure, 2° que le tube du manomètre soit gradué et contienne de l'air sec, 3° que le mercure s'élève à la même hauteur dans le tube du manomètre et dans le tube vertical TT′, il est évident que l'air sera enfermé sous la pression atmosphérique et que l'on connaîtra le volume qu'il occupe sous cette pression. Maintenant, si à partir de ce point, l'on fait agir la pompe foulante pour introduire de l'air ou de l'eau au dessus de la surface supérieure du mercure dans le vase en fonte, on exercera ainsi des pressions toujours croissantes sur l'air sec du manomètre, et en même temps

le mercure s'élevera de plus en plus dans le tube vertical. Enfin, pour avoir à chaque instant le volume de l'air comprimé, il suffira d'observer exactement la longueur qu'il occupe encore dans le tube du manomètre à partir de l'extrémité fermée; et pour avoir la pression correspondante, il suffira de mesurer la différence des niveaux du mercure dans le tube du manomètre et dans le tube vertical.

Or, le tube vertical ayant 78 pieds, ou plus de 30 fois 28 pouces, on pourrait pousser l'expérience jusqu'à une trentaine d'atmosphères, s'il ne fallait pas déduire de cette colonne la hauteur du mercure dans le manomètre : c'est pour cette raison que les expériences ont été limitées à 27 atmosphères.

On conçoit facilement que des expériences de cette nature exigeaient toute l'habileté dont MM. Arago et Dulong ont donné tant de preuves par leurs belles découvertes dans toutes les branches de la physique. Il nous serait impossible de décrire ici, dans tous ses détails, la perfection avec laquelle les diverses pièces de l'appareil étaient ordonnées et toutes les précautions ingénieuses qui avaient été prises pour assurer l'exactitude des résultats. Nous indiquerons seulement quelques-unes des dispositions les plus essentielles de la pompe foulante, du tube vertical, et du manomètre.

Pompe foulante.—Il ne fallait pas seulement que la pompe foulante fût assez bien faite pour injecter l'eau sous une pression de 27 atmosphères, il fallait encore qu'elle pût maintenir l'eau injectée d'une manière assez rigoureuse pour que les sommets des colonnes de mercure fussent parfaitement fixes dans le manomètre et dans le tube vertical. Cette condition était remplie au moyen de la soupape B, qui se trouve au bas de la course du piston. De plus, ce que nous disons ici de la soupape de la pompe s'applique à toutes les *jointures* de l'appareil : elles devaient être assez exactement faites pour qu'il n'y eût aucune *fuite*.

Tube vertical.—Il était composé de 13 tubes de cristal fa-

briqués exprès dans la verrerie de Choisy par MM. Thibeaudeau et Bontemps. Chacun de ces tubes avait 2 mètres de longueur, 5 millimètres de diamètre intérieur et 5 millimètres d'épaisseur; ils étaient réunis par de fortes viroles, comme on le voit en C, *figure* 228, et plus en détail dans la *figure* 225. La plaque horizontale H sert de repère; il y en a une pareille au bas de chaque tube, et l'on mesure la distance de deux repères consécutifs en posant la règle divisée sur le repère inférieur et en poussant une petite languette L, *figure* 225, jusqu'à ce qu'elle se trouve à l'affleurement du repère supérieur. Pour que les tubes inférieurs ne fussent pas surchargés et comme écrasés par le poids des tubes supérieurs, on avait eu l'heureuse idée d'attacher à l'extrémité supérieure de chaque tube des cordons qui redescendaient verticalement après avoir passé sur des poulies et qui étaient tirés en bas par des poids égaux au poids du tube (*Fig.* 228). Ainsi la colonne n'exerçait aucune pression sur sa base.

Manomètre. — Le tube manométrique était semblable à ceux de la colonne verticale, seulement il avait été effilé à son extrémité supérieure, gradué avec soin, sans rien tracer au diamant sur sa surface, de peur d'affaiblir sa résistance, et ensuite ajusté sur la platine E du vase en fonte. Alors on y avait fait passer pendant long-temps un courant d'air sec, et enfin on avait scellé à la lampe son sommet effilé, sans faire éprouver une altération sensible à sa graduation. On voit dans la *figure* 226 comment l'extrémité inférieure du tube manométrique est ajustée sur la platine E du vase en fonte; on doit remarquer que la virole se recourbe sous l'épaisseur du tube, afin que la pression ne tende pas à le soulever. Pour que l'air du manomètre fût bien maintenu à la même température, on l'avait enveloppé d'un manchon de verre HH′ dans lequel passait continuellement un courant d'eau. Enfin, pour voir avec une grande exactitude la position du sommet de la colonne de mercure on avait disposé en dedans du

manchon un voyant V avec une loupe; cette pièce devait monter et descendre, et on lui donnait ces mouvemens au moyen d'un tourniquet Q sur lequel était enroulé un fil de soie qui allait passer sur les poulies supérieures L', sur la poulie inférieure L, et qui venait s'attacher à la garniture du voyant.

Des thermomètres (*Fig.* 227) convenablement disposés donnaient à chaque instant la température des diverses parties de l'appareil; et des baromètres, l'un supérieur et l'autre inférieur, donnaient aussi la pression atmosphérique au sommet de la colonne verticale.

On peut donc admettre la loi de Mariotte comme rigoureusement démontrée pour l'air par l'expérience directe jusqu'à 27 atmosphères, et l'on ne peut guère douter, d'après cela, qu'elle ne s'étende au moins jusqu'à 50 atmosphères sans altération sensible.

La densité d'un corps étant en raison inverse du volume qu'il occupe, on peut encore exprimer la loi de Mariotte, en disant que *les densités des gaz sont proportionnelles aux pressions qu'ils supportent.* Sous une seule pression atmosphérique, la densité de l'air étant à peu près la 770e partie de la densité de l'eau, il en résulte que, sous une pression de 770 atmosphères, l'air est aussi dense que l'eau. Ainsi, au fond de la mer, à une profondeur de 770 fois 32 pieds, ou de 24640 pieds, qui font à peu près deux lieues, l'air serait plus pesant que l'eau, et, quoiqu'à l'état gazeux, il ne pourrait pas s'élever pour venir à la surface. Mais rien ne prouve jusqu'à présent qu'il y ait de l'air au fond de la mer, comme rien ne prouve qu'il y ait un liquide au dessus de l'atmosphère.

Deux volumes successifs, occupés par un gaz, et les deux pressions correspondantes, forment quatre quantités qui sont en proportion; de telle sorte que, trois étant données, on peut trouver la quatrième. Il en serait de même des deux densités successives, avec les deux volumes ou avec les deux pressions correspondantes.

86. *De la machine pneumatique.* — La machine pneumatique est destinée à faire le vide; elle se compose de deux corps de pompe cylindriques pareils à celui qui est représenté en RR′ (*Fig.* 102.)

PP′ est un piston qui monte et qui descend au moyen de la tige T; mais dans toutes ces positions il *tient le vide*, c'est-à-dire que rien ne peut passer entre son contour et les parois du corps de pompe.

s est la soupape du piston; elle est très-légère, et s'ouvre de bas en haut; elle se lève quand la pression inférieure est un peu plus grande que la pression supérieure, et, dans le cas contraire, elle reste hermétiquement fermée.

La longue tige *crt* est la soupape du corps de pompe; c'est le piston qui l'ouvre et qui la ferme: quand il monte, il la soulève; le renflement *r* vient s'appuyer contre la plaque supérieure du corps de pompe, et le piston glisse à frottement dur sur toute la longueur de la tige *cr*; quand il descend, il l'entraîne avec lui; le tronc de cône *c* tombe dans l'ouverture conique qui est au dessous; sa base ne fait qu'un seul plan avec le fond du corps de pompe, et le piston vient s'appliquer exactement sur ce plan.

Au fond de l'ouverture conique, le *conduit* de la machine prend naissance, il s'étend ensuite jusqu'en *v*; à cette extrémité il porte un pas de vis propre à recevoir des ballons, des récipiens ou d'autres vases dans lesquels on veut faire le vide.

LL′ est la *platine* de la machine pneumatique; elle se compose d'une forte plaque de métal sur laquelle on mastique un plateau de verre de plusieurs lignes d'épaisseur, dont la surface supérieure est *dressée* avec soin et légèrement *doucie*.

C est une *cloche* où l'on veut faire le vide; son bord inférieur est pareillement dressé et douci, afin qu'il puisse s'appliquer exactement sur la platine. Une légère couche de suif achève d'établir l'adhérence; car il ne faut pas, même

quand le vide est fait, que l'air extérieur puisse pénétrer entre la cloche et la platine.

Supposons que le piston soit au milieu de sa course, que les soupapes soient ouvertes, et que l'air soit sous la pression atmosphérique, dans la cloche, dans le conduit et dans le corps de pompe; si l'on abaisse le piston, la seconde soupape se ferme, et l'air ne peut plus repasser du corps de pompe dans la cloche; il s'échappe par la première soupape, et il n'en reste plus quand le fond du piston est venu s'appliquer sur le fond du corps de pompe. Alors le piston étant soulevé, le vide se ferait si les soupapes restaient fermées; mais la seconde soupape s'ouvre, l'air de la cloche arrive pour remplir le vide, et la première soupape reste fermée à mesure que le piston s'élève, parce que la pression intérieure est toujours moindre que la pression extérieure. Si la capacité du corps de pompe est, par exemple, la dixième partie de la capacité de la cloche et du conduit, il arrivera dans le corps de pompe $\frac{1}{11}$ de l'air qu'il faut enlever pour avoir le vide. On rabaisse le piston; la seconde soupape se ferme, et l'air se comprime de plus en plus: bientôt son élasticité l'emporte sur celle de l'air extérieur; il soulève la première soupape et s'échappe dans l'atmosphère. Un autre coup de piston fait sortir encore $\frac{1}{11}$ de l'air restant; puis, en continuant ce jeu alternatif, on fait sortir à chaque coup $\frac{1}{11}$ du reste, puis $\frac{1}{11}$ du reste, et ainsi de suite. D'où l'on voit que jamais le vide ne se pourra faire, puisqu'en prenant la onzième partie d'une quantité et la onzième partie des restes successifs, on ne peut jamais parvenir à prendre cette quantité tout entière. Mais on parvient cependant à réduire l'air de la cloche à une élasticité de plus en plus faible; les meilleures machines les réduisent à 1 ou 2 millimètres de tension. La rapidité de l'opération dépend du rapport qui existe entre la capacité du corps de pompe et celui de la cloche. Ce rapport étant donné, on peut calculer facilement combien il faut de coups de

piston pour réduire l'air à une tension donnée ; et ensuite on peut, par la loi de Mariotte, calculer le poids de l'air qui reste, quand on connaît le poids du volume primitif.

Quand le vide est fait, la pression atmosphérique qui s'exerce sur le piston n'étant plus balancée par aucune pression intérieure, il faut, pour le soulever, faire un effort de $1^k,033$ pour chaque centimètre carré de sa surface, plus encore tout l'effort nécessaire pour vaincre le frottement. Un piston de 1 décimètre de rayon serait aussi difficile à soulever qu'un poids d'environ 300 fois $1^k,033$; ce qui fait plus de 600 livres. Mais dans les machines à deux corps de pompe et à deux pistons, ces pressions se détruisent, et il ne reste à vaincre que les frottemens.

La machine pneumatique est représentée dans son ensemble (*Fig.* 105 et 106). Les tiges des deux pistons sont à *crémaillères ;* elles engrènent dans le même pignon : quand l'une monte, l'autre descend, et leur mouvement alternatif est produit par le mouvement alternatif d'une manivelle.

La *clef* de la machine est un robinet qui porte une ouverture ordinaire et une ouverture *latérale* (*Fig.* 104) ; celle-ci est conique, et se ferme au moyen d'un bouchon de métal B. Quand la machine doit tenir le vide, on tourne l'ouverture latérale du côté des corps de pompe ; et pour *rendre l'air*, on la tourne du côté de la cloche, et ensuite on tire le bouchon de métal.

Le baromètre qui marque à chaque instant la tension de l'air de la cloche, s'appelle une *éprouvette*. Quelquefois c'est un baromètre ordinaire BB', *figure* 106, et, le plus souvent, c'est un baromètre tronqué. Dans ce dernier cas, l'éprouvette est enfermée dans une cloche longue et étroite VV' (*Fig.* 102) qui communique au conduit de la machine. Cette communication s'ouvre ou se ferme au moyen d'un robinet. Le baromètre tronqué est vu de profil (*Fig.* 102), et il est représenté de face (*Fig.* 99 et 107) ; s'il a seulement 7 pouces de longueur depuis le niveau extérieur *n* jusqu'à son

sommet *s*, il ne commence à descendre que quand la pression de l'air est réduite au quart de la pression atmosphérique; enfin, il descend de plus en plus dans la branche fermée, et monte dans la branche ouverte, de telle sorte que la pression de l'air de la cloche est toujours mesurée par la différence des deux niveaux. Au moment où l'on rend l'air, la pression subite qui s'exerce sur le mercure le refoule avec violence dans la branche fermée, et il est bon d'y ménager un *étranglement*, de peur qu'il n'en brise le sommet.

La machine pneumatique fut inventée vers 1650, par Otto de Guericke, bourgmestre de Magdebourg; elle fut, peu de temps après, changée et perfectionnée par un grand nombre de physiciens. Hook plaça le corps de pompe verticalement, Papin ajouta la platine, Hawksbée fit deux corps de pompe au lieu d'un, et ensuite les soupapes furent modifiées d'une infinité de manières.

86. Otto de Guericke fit avec sa machine l'expérience curieuse des *Hémisphères de Magdebourg*; elle consiste à faire le vide dans un globe de métal dont les deux moitiés sont simplement juxtà-posées. Avant que le vide soit fait, les deux *hémisphères* se séparent facilement; mais quand il n'y a plus d'air intérieur pour balancer la pression extérieure, l'adhérence est si forte que toute la force d'un homme est insuffisante pour les séparer. En effet, si la section des hémisphères a seulement 1 décimètre de rayon, ou environ 300 centimètres carrés de surface; la pression extérieure qui les unit équivaut à plus de 300 kilogrammes. On met une bande de cuir à la jonction des hémisphères pour favoriser le contact, et il y a un robinet qui s'ouvre pour faire le vide et qui se ferme pour empêcher la rentrée de l'air.

Boyle fut un des premiers et des plus habiles à se servir de la machine pneumatique. Le vide était alors une chose nouvelle; quelques philosophes avaient imaginé autrefois que le vide était possible, mais, avant Toricelli, personne n'avait pu le produire. Dans la chambre barométrique

toutes les expériences étaient difficiles, et les académiciens de Florence, malgré tous leurs efforts ingénieux, n'avaient pu obtenir qu'un petit nombre de résultats. Enfin la machine de Otto de Guericke donnait le moyen de faire le vide à volonté dans de très-grands espaces; et, ce qui était plus précieux encore, elle donnait le moyen d'exposer directement dans ces espaces, sans air et sans pression, des animaux, des plantes et des corps de toute espèce. On conçoit aisément combien ces expériences devaient exciter la curiosité des physiciens.

Dans le vide les corps enflammés s'éteignent; ainsi l'air contient des élémens qui sont nécessaires à la combustion, et à la production de la flamme.

La fumée tombe comme une masse pesante; ainsi les nuages tomberaient s'il n'y avait pas de l'air pour les soutenir.

Il y a des insectes qui vivent dans le vide pendant plusieurs jours; ainsi ils peuvent passer plusieurs jours sans respirer sensiblement. Les oiseaux périssent en quelques secondes, même avant que le vide soit complètement fait. Il faut cependant que l'air de la machine soit plus raréfié que l'air qu'ils respirent dans les hautes régions de l'atmosphère où ils s'élèvent.

La plupart des fruits et des substances fermentescibles se conservent très-bien dans le vide. Le procédé de M. Appert, pour conserver les substances alimentaires, est une ingénieuse et très-utile application de cette vérité.

Une boule mince de verre, remplie d'air, se brise.

On fait jaillir un liquide à une grande hauteur (*Fig.* 113).

L'eau froide entre en ébullition; ainsi, au sommet des hautes montagnes, où l'air est très-raréfié, l'eau doit bouillir plus tôt que dans la plaine, et c'est ce que l'on observe en effet à l'hospice du Saint-Bernard et ailleurs.

87. *Machine de compression.* — La machine de compression est destinée à comprimer l'air. Elle se compose de deux corps de pompe, semblables à ceux de la ma-

chine pneumatique; la seule différence est dans les soupapes, qui s'ouvrent en sens contraire, c'est-à-dire de *haut en bas*. Quand on abaisse le piston, il comprime l'air, et le fait passer dans le récipient; quand on le relève, l'air extérieur ouvre la première soupape et entre dans le corps de pompe, tandis que l'air comprimé du récipient presse la seconde soupape, et la tient fermée. Enfin, quand on rabaisse le piston, la première soupape se ferme, l'air se comprime de plus en plus, il devient capable d'ouvrir la seconde soupape et passe encore dans le récipient, et ainsi de suite.

L'éprouvette de la machine de compression est un tube droit, fermé à son sommet, rempli d'air, et plongeant par son extrémité inférieure dans une cuvette de mercure. Au commencement de l'expérience l'air du tube est sous une pression atmosphérique, et le mercure est au même niveau à l'intérieur et à l'extérieur; à mesure que la pression augmente le mercure monte dans le tube, le volume de l'air se réduit successivement à la moitié, au tiers ou au quart de ce qu'il était, et d'après la loi de Mariotte, on juge qu'il est sous une pression de deux, trois ou quatre atmosphères. Dans le récipient la pression de l'air est plus grande que dans le tube, de toute la hauteur de la colonne de mercure qui s'élève au dessus du niveau extérieur.

88. Il y a des *pompes de compression* qui sont destinées à être vissées sur divers appareils pour y comprimer de l'air; alors elles se composent simplement d'un corps de pompe et d'un piston sans soupape. Le corps de pompe présente trois modifications particulières (*Fig.* 108); 1° il porte un pas de vis à son extrémité inférieure; 2° il est muni d'une soupape *s* dont le piston s'approche de très-près quand il arrive au bas de sa course; 3° vers sa partie supérieure, et sur sa paroi latérale, il est percé d'un petit trou *t* qui reste toujours ouvert et qui fait cependant l'office de

soupape, parce qu'il est tantôt au dessus, tantôt au dessous du piston.

Quelquefois, au lieu d'un petit trou latéral, le corps de pompe porte une véritable soupape latérale (*Fig.* 109); cette disposition offre l'avantage de pouvoir comprimer des gaz quelconques; car il suffit pour cela de faire communiquer le tube de la soupape au réservoir qui les contient.

89. *Mesure des pressions des gaz contenus dans divers appareils.* — On mesure en général les pressions des gaz par deux moyens : par le moyen des colonnes liquides ou par le moyen des soupapes. Les appareils à colonne liquide s'appellent des *manomètres*, les soupapes s'appellent, en général, *soupapes de pression*, et *soupapes de sûreté* quand elles sont destinées à empêcher les explosions.

90. *Soupapes de pression.* — Ces soupapes sont indéfiniment variables dans leurs formes et dans leurs dimensions ; tantôt elles ont la forme d'un cône tronqué (*Fig.* 110 et 112); tantôt elles sont un simple plan qui s'adapte très-exactement sur les parois de l'ouverture (*Fig.* 111). Dans tous les cas elles doivent fermer hermétiquement jusqu'à l'instant où elles sont soulevées. Pour estimer l'élasticité du gaz qui est capable de les soulever, il faut connaître deux choses, 1° le poids total de la soupape; 2° l'étendue de la surface qui est exposée à la pression verticale du gaz. Supposons que le poids soit évalué en kilogrammes, et que l'étendue de la surface pressée soit évaluée en centimètres carrés : si le poids est, par exemple, de 100 kilogrammes, et la surface de 25 centimètres, chaque centimètre carré supportera 4 kilogrammes; donc, d'après ce que nous avons vu (74), le nombre des atmosphères est égal à $\frac{4}{1,033}$ ou à $3^{at},87$, plus encore la pression atmosphérique ordinaire qui s'exerce aussi sur la soupape. Ce même moyen s'applique aux liquides comme aux gaz ; c'est celui que l'on emploie pour essayer les tuyaux de conduite et les cylindres des machines à vapeur.

91. *Manomètres.* — Le nom de manomètre avait été donné, par Varignon, à un appareil qu'il destinait à mesurer la raréfaction de l'air. Maintenant on appelle *manomètre* tout appareil à colonne liquide propre à mesurer des pressions. Le baromètre mesure la pression libre de l'atmosphère; le *manomètre* mesure la pression des fluides contenus dans les espaces fermés. L'éprouvette de la machine pneumatique et celle de la machine de compression sont de véritables manomètres. Cependant on peut établir quelques distinctions dans les appareils de cette espèce.

La *Figure* 103 représente un manomètre, au moyen duquel on mesure la tension des gaz contenus dans le ballon B; il a été employé par De Saussure et ensuite par Berthollet, dans les recherches importantes qu'ils ont faites l'un et l'autre sur la végétation et sur les phénomènes des corps vivans. Les animaux et les plantes étaient renfermés dans le ballon B.

Les *tubes de sûreté* sont des manomètres qui indiquent la tension des gaz contenus dans les appareils auxquels ils sont adaptés. Quand la tension est égale à la pression atmosphérique, le liquide est au même niveau dans les deux branches (*Fig.* 100); et, en général, la différence des niveaux mesure la différence des pressions; il suffit de connaître la densité du liquide contenu dans le tube pour évaluer cette différence de pression en millimètres de mercure.

Les tubes de sûreté ont été inventés par Welter : ils sont d'un grand usage en chimie, parce qu'ils empêchent les *explosions* et l'*absorption*. Quand la pression intérieure devient trop faible, l'air atmosphérique refoule le liquide dans la boule et pénètre dans l'appareil : au contraire, quand elle est trop forte, elle chasse la colonne liquide et trouve une issue par le tube.

Les grands gazomètres qui servent à *lancer* le gaz de l'éclairage, sous une pression constante, sont munis de manomètres qui communiquent aussi à l'air extérieur : il en

est de même dans les soufflerics des forges et dans une foule d'autres appareils industriels.

Quand les pressions doivent être très-fortes, on emploie un manomètre analogue à celui de la machine de compression, on enferme de l'air au dessus de la colonne liquide (*Fig.* 101), et la réduction de volume qu'il éprouve donne, par la loi de Mariotte, les divers états de pression par lesquels il passe. Seulement il faut tenir compte des variations de chaleur qui peuvent donner à l'air plus ou moins de ressort, comme nous le verrons plus tard.

92. *Fusil à vent.* — Il suffit de nommer cet appareil pour que l'on en devine le mécanisme. La crosse contient un réservoir à soupape dans lequel on comprime de l'air sous huit ou dix atmosphères. On y ajoute un canon qui reçoit le projectile et qui en dirige le mouvement. On fait partir une détente qui presse la soupape; l'air sort avec violence, chasse la balle, et la soupape se referme à l'instant. On peut tirer de suite plus ou moins de coups, suivant que le réservoir est plus ou moins grand. Le fusil à vent peut lancer la balle avec autant de vitesse que le fusil à poudre: cet effet ne se produit pas sans bruit ni sans lumière. L'air comprimé, se débandant subitement, fait une explosion pareille à celle du crève-vessie; et à l'extrémité du canon on voit un jet de flamme qui est produit par le frottement des petites poussières solides que l'air rencontre ou qu'il emporte avec lui; car il paraît que dans un air très-pur il n'y a plus de flamme perceptible.

93. *Appareils à gaz portatif.* — Dans ces appareils nouveaux, le gaz de l'éclairage est comprimé sous trente atmosphères. Les réservoirs, avant d'être employés, sont soumis à une forte épreuve : ils ne sont admis au service que quand ils ont pu résister à soixante atmosphères. Il y a deux sortes d'explosions à craindre : celle qui résulterait d'un mélange du gaz avec l'air atmosphérique, et celle qui résulterait de la rupture des parois. Celle-ci offre un phé-

nomène de *recul* très-curieux. Dès que le gaz s'est ouvert une issue, sa force motrice exerce une réaction, et lance le réservoir comme le fusil à vent lance la balle. On conçoit qu'il doit être fort difficile de retenir un gaz sous une pression aussi énorme que trente atmosphères. On y parvient cependant; et, ce qui est peut-être encore plus difficile, on parvient, par un mécanisme ingénieux, à en régler la dépense et à n'en laisser sortir que la proportion juste qui est nécessaire à l'éclairage.

CHAPITRE VII.

De l'équilibre des corps flottans et des corps plongés dans les fluides.

94. On voit des corps pesans, qui se meuvent en sens contraire de la pesanteur : le liége, le bois, et beaucoup d'autres corps remontent quand ils sont plongés dans l'eau; le fer remonte de la même manière, quand il est plongé dans le mercure; la fumée s'élève dans l'air, les nuages restent suspendus dans l'atmosphère, à peu près comme les vaisseaux restent flottans à la surface des eaux. Les fluides paraissent avoir une puissance particulière pour rejeter les corps qu'ils enveloppent de toutes parts, et pour soutenir ceux qui reposent sur leurs surfaces. Tous ces phénomènes, et même ceux de l'aérostatique et de l'ascension des ballons, dépendent d'un seul principe, que l'on appelle *le principe d'Archimède*. C'est en effet Archimède qui en est l'inventeur, et c'est à l'occasion de cette découverte que l'on rapporte de lui ce trait d'enthousiasme : il fut, dit-on, saisi d'une si grande joie qu'il sortit du bain, et qu'il parcourut les rues de Syracuse en s'écriant : *Je l'ai trouvé, je l'ai trouvé.*

95. *Principe d'Archimède.* — Ce principe général peut être énoncé de la manière suivante : *un corps plongé dans un fluide y perd une partie de son poids égale au poids du fluide qu'il déplace;* que le fluide soit un liquide ou un gaz, la proposition est également vraie.

Pour prendre une première idée du principe d'Archimède, concevons un grand vase rempli d'eau, et, dans l'intérieur de l'eau, un cube dont les faces supérieures et infé-

rieures soient horizontales (*Fig.* 116). Il est évident, d'après les principes d'hydrostatique : 1° que les pressions latérales sont égales et contraires, et qu'elles se détruisent l'une l'autre; 2° que la face supérieure supporte de *haut en bas* une pression égale au poids de la colonne liquide qui repose sur elle; 3° que la face inférieure supporte de *bas en haut* une pression égale au poids de la colonne liquide qui reposerait sur elle, si le cube était lui-même de l'eau. Cette pression l'emporte sur la première, de tout le poids de la colonne liquide que déplace le cube, donc le cube est repoussé en haut avec une force égale à cet excès de pression; donc enfin il perd une partie de son poids égale au poids du volume liquide qu'il déplace. La pression de bas en bas en haut est ce que l'on appelle *la poussée du fluide*. Ainsi, un corps plongé est soumis à deux forces contraires : à son poids, qui tend à le faire descendre, et à la poussée du fluide, qui tend à le faire remonter. Si ces deux forces sont égales, le corps reste en équilibre; il a perdu tout son poids. Si la poussée du fluide est la plus grande, le corps est repoussé jusqu'à la surface; enfin, si elle est la plus faible, le corps tombe au fond du vase. On pourrait facilement, par quelques considérations mécaniques, généraliser cette proposition, et l'étendre aux corps de forme quelconque; mais on peut aussi la démontrer directement par les expériences de la *balance hydrostatique*. Cet appareil est une balance ordinaire, au moyen de laquelle on peut peser les corps, d'abord en les laissant dans l'air, et ensuite en les plongeant dans un fluide. C (*Fig.* 115) est un cylindre creux en cuivre, dont le cylindre massif P peut remplir exactement la capacité. On les met ensemble dans l'un des bassins de la balance, et dans l'autre bassin l'on met des poids pour établir l'équilibre. Cela fait, on met la balance au repos; on attache le cylindre P par un fil très-fin, on le suspend au dessous du bassin pour le faire plonger dans l'eau, comme il est représenté dans la *figure* 115, et

l'on trouve qu'il a perdu de son poids, car dans cette seconde pesée la balance est loin d'être en équilibre. Alors, si on verse de l'eau dans le cylindre C, de manière à le remplir exactement, l'équilibre est rétabli; donc, en plongeant dans l'eau, le cylindre P perd une partie de son poids égale au poids du liquide qu'il déplace.

Voici une autre démonstration du principe d'Archimède, qui est tout-à-fait indépendante de la forme du corps plongé.

Dans l'intérieur de la masse fluide concevons un volume quelconque, une sphère, par exemple, qui ait un mètre de rayon. Imaginons que les molécules d'eau, qui sont actuellement comprises dans ce volume, soient congelées pour un moment, c'est-à-dire qu'elles forment une sphère solide au lieu d'une sphère liquide; mais que dans l'acte de la congélation elles ne soient ni éloignées, ni rapprochées l'une de l'autre, et qu'elles conservent exactement leurs positions et leurs distances. Il est évident que la sphère solide restera suspendue et en repos, comme faisait la sphère liquide; car l'adhérence que nous venons d'établir entre les diverses molécules ne peut ni les soutenir ni les faire tomber; elle ne change rien aux pressions ni à la pesanteur. Cette sphère solide et pesante a donc perdu son poids, puisqu'elle ne tombe pas, et elle l'a perdu parce qu'elle est environnée d'un fluide qui la presse de toutes parts. Donc, de l'ensemble des pressions inégales qui s'exercent en tous les points de sa surface, résulte une force unique, agissant de bas en haut, et précisément égale au poids de la sphère entière; ce raisonnement s'applique à un corps de forme quelconque.

Or, quelle que soit la forme du corps qui se congèle, comme nous le supposons; une fois qu'il est congelé, on pourrait le tourner d'une manière quelconque autour de son centre de gravité, et dans toutes les positions il resterait en équilibre. Donc la force de bas en haut, ou *la poussée du fluide*, est une force qui a son point d'application au centre

de gravité du fluide congelé; ce point s'appelle *le centre de pression*.

Si, au lieu de la substance fluide elle-même que nous supposons congelée, nous imaginons dans l'intérieur du fluide un corps étranger de substance quelconque, de liége, de marbre ou de fer, il est évident qu'il supportera de la part du fluide environnant les mêmes pressions qu'une masse congelée qui aurait la même forme que lui. Donc la poussée du fluide et le centre de pression ne dépendent que de la quantité et de la forme du liquide déplacé, sans dépendre en aucune manière de la nature de la substance qui déplace le liquide.

Ainsi, un corps plongé dans un fluide est toujours soumis à deux forces, dont nous connaissons maintenant les grandeurs, les directions et les points d'application : la première de ces forces est le poids du corps, qui agit de haut en bas, et qui est appliqué au centre de gravité de sa masse; la seconde est la poussée du fluide, qui agit de bas en haut, et qui est appliquée au centre de gravité du fluide déplacé : de là résultent des conditions d'équilibre et des conditions de stabilité ou d'instabilité, que nous allons déterminer.

96. *Conditions d'équilibre des corps plongés.* — Pour qu'un corps soit en équilibre au milieu d'un fluide, il faut en général que deux conditions soient remplies, 1° que le poids du corps soit égal au poids du fluide déplacé; 2° que le centre de gravité du corps et celui du fluide déplacé se trouvent sur une même verticale. Ces conditions se déduisent de ce qui précède; mais nous pouvons les rendre encore plus sensibles par un exemple. LSPS′ (*Fig.* 117) est une sphère, composée de deux parties; l'une, SLS′, qui est de liége, et l'autre, SPS′, qui est de plomb. Son centre de gravité est en g, et son poids est précisément égal au poids de l'eau qu'elle peut déplacer. Si on l'ajuste dans l'eau de manière que la section SS′ soit verticale (*Fig.* 118), elle sera

soumise à deux forces parallèles, égales et contraires, qui formeront un couple, savoir, à son poids gV et à la poussée du fluide cF; et l'équilibre n'aura lieu que quand le couple sera déployé comme dans la *figure* 117, ou reployé sur lui-même comme dans la *figure* 119; dans le premier cas l'équilibre est stable, et il est instable dans le second.

Quand le corps est homogène, son centre de gravité coïncide avec le centre de pression, et la première condition d'équilibre est alors la seule nécessaire. On peut même l'exprimer autrement en disant que le corps et le fluide qui l'entoure doivent avoir la même densité. Une boule de cire reste suspendue au milieu de l'eau; elle tombe dans l'alcool, et elle nage sur le mercure, parce que sa densité est à peu près égale à celle de l'eau, plus grande que celle de l'alcool, et beaucoup moindre que celle du mercure.

Les poissons paraissent être en équilibre dans l'eau où ils vivent, car ils peuvent s'y tenir en repos sans être entraînés par leur poids ni rejetés par la poussée du fluide. Ainsi un poisson pèse précisément autant que l'eau qu'il déplace, il pèse un kilogramme s'il déplace un litre, et mille kilogrammes s'il déplace mille litres ou un mètre cube. Une baleine de 20 mètres de long déplace à peu près 500 mètres cubes, et pèse en conséquence 500 mille kilogrammes; et même un peu plus, à cause que l'eau de mer est un peu plus pesante que l'eau douce.

S'il est nécessaire que les poissons soient en équilibre pour n'être pas condamnés à se soutenir par un mouvement continuel au dessus des profondeurs de la mer, il est nécessaire aussi que leur équilibre ne soit ni instable, ni indifférent; et cette condition est remplie par un organe particulier qui sert aussi à d'autres usages; car dans l'organisation des êtres il n'y a pas une pièce qui n'ait qu'une seule fin. Cet organe est la vessie natatoire. Il a diverses formes dans les différentes espèces, mais il est toujours

placé pour alléger les parties supérieures et pour laisser plus de poids aux parties inférieures. De cette manière le centre de gravité du corps est plus bas que le centre de pression, et la condition de stabilité se trouve remplie. D'après les observations curieuses de M. Biot, le gaz de la vessie natatoire n'est pas de l'air atmosphérique; il est de l'azote presque pur dans les individus qui vivent près de la surface; et il se compose de près de 0,9 d'oxigène et de 0,1 d'azote, dans ceux qui vivent à des profondeurs de 1000 à 1200 mètres. A 8 ou 9000 mètres de profondeur, ces gaz seraient aussi denses que l'eau, et les vessies natatoires deviendraient inutiles pour l'équilibre.

Il paraît que les poissons se servent aussi de leur vessie natatoire pour exécuter des mouvemens de haut en bas ou de bas en haut, qu'ils n'exécuteraient que difficilement au moyen de leurs nageoires. Il suffit pour cela qu'ils puissent la resserrer ou la gonfler à volonté : dans le premier cas, leur poids restant le même et leur volume devenant moindre, ils sont plus denses que l'eau, et ils tombent; au contraire, dans le second cas, ils montent comme du liége.

Cependant ce phénomène n'est pas aussi simple qu'on l'imagine au premier instant. Un poisson au milieu de l'eau ne peut pas se gonfler comme un mammifère qui retient son haleine; il ne trouve pas de l'air à prendre ou à rejeter; c'est avec la même quantité de gaz qu'il doit opérer ces mouvemens. Il faut donc que, par une action volontaire, le gaz soit sans cesse plus comprimé qu'il ne le serait par le fluide environnant, et qu'un peu plus ou un peu moins d'énergie dans cette action comprimante lui donne successivement un moindre ou un plus grand volume. Cet effet est rendu sensible par l'appareil de la *figure* 114, qui s'appelle un *ludion*. Le ludion L monte ou descend, suivant que l'on soulève ou que l'on presse la membrane MM′ qui ferme le vase.

Dans les poissons que l'on pêche à une profondeur de

mille mètres, le gaz de la vessie natatoire est sous une pression d'eau équivalente à cent atmosphères; arrivé à la surface, il tend à prendre un volume cent fois plus grand; aussi observe-t-on que tout l'effort musculaire ne suffit plus pour le retenir; il s'échappe en refoulant tous les organes voisins, et surtout la membrane de l'estomac, qui est alors tellement tendue et dilatée, qu'elle vient former au dehors de la gueule une espèce de ballon fort singulier. On peut juger par là que les régions de la mer ont leurs peuples différens, non-seulement suivant les climats, mais encore suivant les profondeurs.

97. *Conditions d'équilibre des corps flottans.* — Il y a deux conditions d'équilibre pour les corps flottans comme pour les corps plongés, et ces conditions sont les mêmes; seulement la condition de stabilité est différente. Un vaisseau, par exemple, qui pèse un million de kilogrammes, n'est en équilibre que quand il déplace mille mètres cubes d'eau, qui pèsent comme lui un million de kilogrammes, et quand son centre de gravité et le centre de pression de l'eau se trouvent dans la même verticale. Mais il n'est point nécessaire que le centre de gravité se trouve au dessous du centre de pression; il suffit seulement qu'il se trouve au dessous d'un autre point que l'on appelle le *métacentre*, et dont la détermination nous entraînerait un peu trop loin. La position du métacentre dépend de la forme du vaisseau; celle du centre de gravité dépend de la distribution de la charge, et c'est de leur distance relative que dépend la rapidité des oscillations. C'est pour cette raison, et pour beaucoup d'autres encore, que, dans le chargement des vaisseaux, il y a un art particulier à distribuer convenablement les poids.

98. *Des aérostats.* — Le principe d'Archimède est vrai pour les gaz comme pour les liquides. Les corps plongés dans les gaz y perdent une partie de leur poids égale au poids du volume de gaz qu'ils déplacent. Si l'air atmosphé-

rique était très-pesant, s'il pesait, par exemple, deux ou trois fois autant que l'eau, la plupart des corps terrestres seraient soulevés par la poussée de ce fluide; et, nous-mêmes, nous serions emportés dans l'air comme le liége est emporté dans l'eau; nous ne pourrions être en équilibre que quand nous serions arrivés à une hauteur beaucoup plus grande que la hauteur des nuages. Mais l'air est si léger, il fait perdre aux corps si peu de leur poids, qu'il fallait une grande hardiesse de génie pour concevoir la possibilité de s'élever dans l'atmosphère, de s'y soutenir en équilibre, et d'y voguer librement comme on vogue sur la mer.

C'est aux frères Montgolfier que nous devons cette merveilleuse découverte. Ils avaient annoncé qu'une grande machine de leur invention serait capable de parcourir l'atmosphère : l'expérience en fut tentée à Annonay le 5 juin 1783, en présence des états-généraux et d'un concours immense de peuple; c'est alors que l'on vit en effet un spectacle nouveau sur la terre, et bien digne d'exciter l'enthousiasme : un globe immense qui s'élevait majestueusement dans les airs et qui semblait s'y soutenir par quelque puissance invisible. Cette espèce de prodige est cependant bien facile à comprendre. La *montgolfière*, car c'est ainsi que l'on appelle les appareils de cette nature, la montgolfière se compose d'un globe en papier vernis ou en taffetas, qui porte à sa partie inférieure une ouverture de quelques pieds carrés. Au dessous de cette ouverture, et à quelque distance, est suspendu un panier léger, en fil de métal, contenant un corps combustible, soit de la paille hachée, soit de la laine ou du papier. Ce combustible étant enflammé, l'air chaud qu'il produit monte de lui-même, pénètre dans le globe, et en remplit bientôt toute la capacité. A volume égal, l'air chaud pèse moins que l'air froid; ainsi le poids du globe est moindre que le poids de l'air qu'il déplace, et il doit s'élever, par l'excès d'énergie de la poussée du fluide : il s'élève, emportant avec lui le combus-

tible enflammé qui produit sa puissance ascensionnelle, et, pour qu'il s'arrête, il faut qu'il arrive dans des couches d'air assez raréfiées pour que la différence des poids, de l'air froid déplacé et de l'air chaud intérieur, soit justement égale au poids de l'enveloppe, du panier et du combustible qu'il contient.

Un physicien célèbre, dont nous déplorons la perte récente, Charles, eut l'heureuse idée de remplacer l'air chaud par le gaz inflammable, que l'on appelle aujourd'hui *l'hydrogène*, dont Cavendish avait fait connaître l'extrême légèreté dès l'année 1766. L'hydrogène est plus de quatorze fois plus léger que l'air, car sa densité est 0,0688, en prenant celle de l'air pour unité. Un centimètre cube d'air pèse $0^{g},001299075$, et $1000^{m.c.}$ pèsent $1299^{k},075$, tandis que $1000^{m.c.}$ d'hydrogène ne pèsent que $89^{k},760$. La différence est 1209,699. Ainsi un globe de 1000 mètres cubes, rempli d'hydrogène, peut enlever un poids de $1209^{k},699$. Un globe de 500 mètres cubes ne pourrait enlever que $604^{k},849$. C'est un *ballon* de cette grandeur que Charles fit construire; et, pour montrer la confiance que devait inspirer sa découverte, il entreprit, avec Robert, ce fameux voyage dans lequel il fut porté en quelques minutes à la hauteur de quatre ou cinq cents toises, et parcourut, dans cette région de l'atmosphère, plus de neuf lieues dans l'espace de deux heures. C'est du milieu des Tuileries que Charles fit son ascension; toute la population de Paris était en mouvement; les places publiques, les sommets des édifices, et tous les lieux élevés étaient couverts de spectateurs: un coup de canon fut le signal du départ, et bientôt on vit monter le ballon, comme un météore qui s'élève sur l'horizon; au plus haut des airs, on distinguait encore les banderolles flottantes, éclairées par le soleil, et les navigateurs tranquilles qui saluaient la terre. Jamais une expérience de physique n'excita tant d'admiration et un tel concert d'applaudissemens.

Charles ne pouvait manquer d'avoir des imitateurs, et il en eut en effet dans tous les pays savans. Mais entre tous les voyages aérostatiques qui furent entrepris pour des recherches scientifiques, on distingue ceux qui furent exécutés en France, en 1804, par MM. Gay-Lussac et Biot. Dans une première ascension, ces deux physiciens, parvenus à la hauteur de 4000 mètres, firent des expériences importantes sur l'intensité magnétique de la terre, sur l'électricité de l'air et sur la température de ces hautes régions. Dans une seconde ascension, M. Gay-Lussac, seul, s'éleva à la hauteur de 7000 mètres, la plus grande à laquelle l'homme soit jamais parvenu. MM. de Humboldt et Bonpland se sont élevés à 6100 mètres sur le Chimboraço au dessus du volcan de Cotopaxi. A cette grande hauteur on éprouve un froid très-vif, le thermomètre de M. Gay-Lussac descendit à 10° au dessous de glace, tandis qu'à la surface de la terre il marquait 30°. La sécheresse de l'air est si grande et les corps hygrométriques perdent si rapidement leur humidité, qu'on les voit se distordre et se tourmenter dans tous les sens. Le ciel paraît d'un bleu très-foncé et mêlé d'une teinte noire. Suspendu au milieu de ces espaces, dans un air si raréfié, à une si grande distance de la terre et de tous les corps résistans, aucun bruit ne vient frapper l'oreille, aucun objet ne se présente à la vue, et l'on éprouve alors un sentiment de solitude que M. Gay-Lussac seul peut décrire. Après une navigation de six heures, dans laquelle il avait parcouru plus de trente lieues en ligne horizontale, M. Gay-Lussac descendit lentement et aborda à la terre dans les environs de Rouen. Nous citerons en leur lieu les résultats dont il a enrichi la science par ce mémorable voyage.

CHAPITRE VIII.

Principes de l'hydrodynamique et de l'hydraulique.

99. L'HYDRODYNAMIQUE a pour objet de déterminer les principes du mouvement des fluides; l'hydraulique est l'application de ces principes à l'art de conduire les eaux et de les faire servir à mouvoir les machines.

100. La question du mouvement des fluides est l'une des plus importantes de la mécanique rationnelle; mais aussi elle est une des plus compliquées et des plus difficiles. Une masse fluide étant en repos, il ne faut, pour la mettre en agitation dans toute son étendue, qu'un léger dérangement dans une seule de ses molécules; et les mouvemens qui en résultent sont modifiés par tant de causes, soit dans leurs vitesses, soit dans leurs directions, qu'il est à peine possible de concevoir la variété et la complication des phénomènes auxquels ils peuvent donner naissance. Cependant nous possédons sur ce sujet quelques lois fondamentales, déterminées par la théorie, et une foule d'expériences, qui, sans être soumises au calcul, présentent de très-utiles applications dans les arts,

101. *De l'écoulement des liquides par les orifices en minces parois.*—Les parois des vases qui contiennent des liquides supportent en général deux pressions (*Fig.* 124): l'une, qui s'exerce de dedans en dehors, et qui repousse la paroi; l'autre, qui s'exerce de dehors en dedans, et qui tend à l'enfoncer. La première résulte des pressions de la colonne liquide qui s'élève au dessus du point de la paroi que l'on considère, et du poids que cette colonne elle-même peut

supporter à son sommet ; la seconde est la pression atmosphérique, ou en général la pression du milieu qui enveloppe le vase. Lorsqu'on perce une ouverture, soit dans le fond, soit dans la paroi latérale, il y a une condition pour que le liquide s'écoule : c'est que la pression intérieure, qui tend à produire l'écoulement, soit plus grande que la pression extérieure, qui tend à l'empêcher. La nécessité de cette condition est évidente d'elle-même ; mais elle peut aussi se montrer par l'expérience. Une éprouvette OR (*Fig.* 140) est remplie d'eau, on en recouvre l'ouverture d'un petit disque de papier joseph; on la retourne, et la colonne liquide reste suspendue : l'écoulement est impossible, à moins que la hauteur de l'éprouvette ne soit de plus de 32 pieds ; car à l'ouverture, la pression de haut en bas, qui est due au poids du liquide, est moindre que la pression de bas en haut, qui est due à l'atmosphère. Si l'éprouvette était remplie de mercure, il suffirait de lui donner un peu plus de 28 pouces de hauteur, pour que le liquide pût s'écouler. En faisant cette expérience avec un tube dont l'ouverture est très-étroite, on peut supprimer le disque de papier joseph, ou tout autre obturateur analogue ; mais si l'ouverture a seulement deux ou trois millimètres de diamètre, l'obturateur devient indispensable. La pression de l'air s'exerçant immédiatement sur la surface mobile du liquide, en refoule toutes les parties avec plus ou moins de force ; et quand cette surface a quelque étendue, elle est déformée et enfoncée par l'air, qui s'ouvre un passage pour gagner le sommet du tube. On dit alors que la colonne liquide est *divisée*.

L'étendue nécessaire pour pour produire ce phénomène dépend de l'intensité de la pression, de la nature du liquide, et aussi de la nature des parois ; mais en général les colonnes plus étroites que 1 millimètre ne se divisent jamais. Nous considérerons toujours, dans ce qui va suivre, l'écoulement résultant d'un excès de pression, et non pas

l'écoulement irrégulier qui se produit par la division de la colonne liquide.

102. Pour déterminer les lois mathématiques de l'écoulement des fluides, on admet, en général, *l'hypothèse du parallélisme des tranches*. On conçoit un orifice en mince paroi (*Fig.* 125), horizontal ou latéral, mais qui soit très-petit par rapport aux dimensions du vase: et l'on admet que, pendant l'écoulement, toutes les molécules liquides qui composent une tranche horizontale très-mince sont animées de la même vitesse; qu'elles descendent ensemble, sans se quitter, se moulant en quelque sorte sur les diverses sections du vase pour former une tranche plus mince ou plus épaisse, suivant que la section où elles passent est plus large ou plus étroite. D'après cette hypothèse on calcule la vitesse que doivent prendre les molécules en passant par l'orifice. M. Cauchy admet *l'hypothèse de la permanence des filets fluides*, il suppose que, la régularité de l'écoulement étant établie, toutes les molécules qui partent du même point du niveau doivent décrire la même courbe pour arriver à l'orifice, et qu'en passant aux mêmes points elles ont toujours la même vitesse. Dans tous les cas, le niveau supérieur étant variable, la pression qui s'exerce à l'orifice est elle-même variable, et produit des vitesses différentes. L'écoulement le plus simple que l'on puisse considérer est celui qui s'établit sous une pression constante.

103. *Divers moyens de produire une pression constante.*— Nous indiquerons seulement trois moyens généraux de produire des pressions constantes: 1° par le *trop plein*, 2° par le *flotteur de M. de Prony*, 3° par le *vase de Mariotte*.

104. Le *trop plein* peut s'obtenir de diverses manières; la plus simple et la plus exacte paraît être la suivante: R (*Fig.* 120) est un réservoir, *s* une soupape qui se lève plus ou moins, *t* un tube, *cc'* une caisse, et *o* l'ouverture par laquelle le liquide s'écoule. On donne de l'eau par la soupape *s*, autant qu'il s'en écoule par l'ouverture *o*. Le

niveau se maintient exactement à la hauteur nn'; le tube t et la caisse cc' sont destinés à empêcher l'agitation que pourrait produire l'eau par sa chute : car les plus faibles mouvemens, même à la surface supérieure, peuvent avoir une influence sur la dépense.

105. *Flotteur de M. de Prony.* — ABCD (*Fig.* 129 et 130) est une grande cuve rectangulaire divisée en trois compartimens C_1, C_2, C_3 par les deux petites cloisons cc' ; le niveau de l'eau passe au dessus de ces cloisons; F et F sont les deux vases composant le flotteur; ils plongent chacun dans l'un des compartimens extrêmes, et servent à faire passer l'eau dans le compartiment moyen qui fournit à l'écoulement ; ll est une grande plaque de métal dans laquelle s'ajustent les orifices et les ajutages par lesquels on veut faire passer le liquide : elle est vue de face *figure* 129, et de profil *figure* 130.

Les vases F, F du flotteur sont en feuilles de cuivre très-minces ; leurs parois sont renforcées par de petites tringles de fer t, qui viennent s'adapter aux grandes tringles T : celles-ci forment un rectangle supporté par le flotteur, et soutenant lui-même un vase V, qui est disposé au dessous de la cuve, et un entonnoir er destiné à conduire dans le vase les produits de l'écoulement.

L'équilibre étant établi, si l'on enlevait 10 kilogrammes d'eau dans l'intérieur de la cuve, le niveau baisserait d'une certaine quantité : mais le même poids de 10 kilogrammes placé dans le flotteur, soit en haut dans les vases F, F, soit en bas dans le vase V, ramenerait le niveau exactement au même point; car le flotteur, devenu plus pesant de 10 kilogrammes, déplacerait de plus 10 kilogrammes d'eau, et produirait donc en s'enfonçant le même effet que si l'on avait remis dans la cuve les 10 kilogrammes d'eau que l'on en avait ôtés. Pour avoir le même niveau pendant l'écoulement, tout se réduit donc à charger le flotteur à chaque instant d'un poids égal au poids de l'eau qui coule par l'o-

rifice. C'est là précisément ce que fait l'entonnoir *er*, en conduisant dans le vase V toute l'eau qui sort de la cuve. Il est vrai que le liquide qui est en chemin entre l'orifice et l'entonnoir n'exerce pas encore sa pression pour rétablir le niveau ; mais il est facile de tenir compte de la différence.

106. *Vase de Mariotte.* — Cet appareil est représenté (*Fig.* 126, 127 et 128). *t* est un tube, qui peut glisser dans le bouchon de la tubulure *b*, et dont l'extrémité inférieure est successivement ou abaissée au point *p*, au dessous du niveau *nv* de l'ouverture latérale, ou relevée au point *h*, au dessus du même niveau. L'ouverture latérale est assez étroite pour que la colonne liquide ne puisse pas se diviser. Le tube étant en *p* (*Fig.* 126), et complètement rempli d'eau ainsi que le flacon, il est clair que le liquide doit s'écouler par l'orifice latéral *v* ; car la pression intérieure se compose de la pression atmosphérique qui s'exerce au sommet du tube et de la pression due au poids de la colonne liquide *sn*, tandis que la pression extérieure n'est que la pression atmosphérique. Le liquide jaillit en effet, et le niveau tombe rapidement dans l'intérieur du tube depuis le point *s* au point *n* ; là il s'arrête, et tout écoulement cesse. Le vase reste plein, l'orifice *v* reste ouvert, et cependant pas une goutte de liquide ne s'échappe. Sur toute l'étendue de la couche horizontale *n'nv* la pression étant la même qu'au point *n*, c'est-à-dire une pression atmosphérique, il n'y a plus de raison pour que le liquide s'écoule. Sur une autre couche, telle que *c'c*, la pression n'est pas due seulement au poids de la colonne supérieure, mais elle est égale à une pression atmosphérique diminuée de la colonne *c'n'*. Que l'on fasse maintenant glisser le tube pour le remonter jusqu'au point *h* (*Fig.* 127) ; à l'instant même l'écoulement recommence, des bulles d'air se forment à l'extrémité inférieure du tube, se gonflent, se détachent, et montent à la file dans la partie supérieure du vase. L'écoulement continue de la sorte, avec *une vitesse constante*,

pendant tout le temps que le niveau du liquide descend depuis le sommet du vase jusqu'en h; car la pression sur la couche $n'nv$ se compose alors de la pression atmosphérique qui s'exerce en h, et de la pression qui est due au poids de la colonne hn; pressions qui restent l'une et l'autre constantes, aussi long-temps que le niveau n'est pas tombé jusqu'en h; à partir de cet instant la vitesse d'écoulement diminue de plus en plus jusqu'à devenir tout-à-fait nulle quand le niveau est arrivé au point n. Le vase de Mariotte peut être présenté sous une grande variété de formes, soit avec un orifice latéral pour l'écoulement, soit avec un orifice horizontal comme l'indique la *figure* 128.

107. *Théorème de Torricelli.* — Dans un appareil où la condition de l'écoulement est remplie, où l'hypothèse du parallélisme des tranches ou de la permanence des filets peut avoir lieu; et où le niveau est maintenu constant par l'un des moyens que nous venons d'indiquer, la loi de l'écoulement est déterminée par le théorème suivant, que l'on appelle théorème de Torricelli : *Les molécules, en sortant de l'orifice, ont la même vitesse que si elles fussent tombées librement dans le vide, d'une hauteur égale à la hauteur du niveau au dessus du centre de l'orifice.* Il résulte de cette proposition trois conséquences importantes.

Premièrement. *La vitesse d'écoulement ne dépend que de la profondeur de l'orifice au dessous du niveau, et nullement de la nature du liquide*; car tous les corps en tombant de la même hauteur dans le vide, acquièrent la même vitesse. Ainsi le mercure et l'eau (*Fig.* 144) prennent la même vitesse, lorsqu'ils s'écoulent par des orifices qui sont à la même profondeur au dessous du niveau. Cependant le mercure est poussé par une pression bien plus grande que l'eau. La profondeur de l'orifice étant, par exemple, de 32 pieds, l'eau ne serait poussée que par la pression d'une atmosphère, tandis que le mercure serait poussé par une pression de 13 atmosphères et demie.

Secondement. *Pour un même liquide les vitesses d'écoulement sont comme les racines carrées des profondeurs des orifices au dessous du niveau;* car les vitesses des corps pesans sont entre elles comme les racines carrées des hauteurs d'où ils sont tombés. Ainsi dans un vase qui aurait, par exemple, cent pieds de hauteur, si l'on perçait deux orifices, l'un à un pied de profondeur et l'autre sur le fond à cent pieds de profondeur, la vitesse du liquide, sortant par le dernier, serait seulement dix fois plus grande que la vitesse du liquide sortant par le premier. Cependant la seconde pression serait cent fois plus grande que la première.

Troisièmement. Si la pression qui s'exerce au sommet de la colonne liquide était plus grande que la pression extérieure qui s'oppose à l'écoulement, cet excès de pression serait équivalent au poids d'une colonne *de même* liquide d'une certaine hauteur; et alors la vitesse des molécules qui s'écoulent serait la même que si elles fussent tombées du sommet de cette seconde colonne, qu'il faut concevoir comme ajoutée au dessus de la première. Ce serait le contraire si la pression extérieure était plus grande que la pression qui s'exerce au dessus du liquide.

108. *Contraction de la veine fluide.* — Avant de vérifier par l'expérience le théorème de Torricelli et les trois autres lois de l'écoulement qui en sont une conséquence, nous devons faire connaître le phénomène curieux de la *Contraction de la veine.* Supposons que le liquide jaillisse d'un vase par un orifice circulaire percé en mince paroi. La veine fluide sera verticale ou parabolique suivant que l'ouverture sera faite au fond du vase ou sur sa paroi latérale : dans les deux cas on sait qu'elle se moule en quelque sorte sur la forme de l'orifice, et qu'elle s'étend à une assez grande distance avant de se diviser et de s'éparpiller en gouttes. Entre la paroi et le point où elle se divise, la veine fluide prend une surface polie, et une forme permanente; malgré le mouvement rapide des molécules qui se succè-

dent incessamment, elle offre l'apparence d'une veine de cristal qui serait parfaitement immobile. L'orifice ayant, par exemple, un centimètre de diamètre, la section de la veine est d'un centimètre à son origine, mais à quelques millimètres de distance, la section diminue, et elle diminue de plus en plus sans cesser d'être circulaire jusqu'à une certaine limite, où se trouve ce que l'on appelle la *section contractée*; passé ce point, la section augmente de nouveau jusqu'à l'instant où la veine se divise par l'accélération de la pesanteur et par la présence de l'air. Dans les *figures* 135 138, *ss'* est la section contractée.

L'écoulement qui se fait par de grandes ouvertures présente aussi le phénomène de la contraction de la veine, mais sur une autre échelle et avec d'autres circonstances extrêmement remarquables. Pour en donner une idée, je citerai ici, sur les veines carrées, quelques observations qui sont dues à MM. Poncelet et Lesbros, capitaines du génie; ces observations sont tirées d'un immense travail qui a été exécuté par ces deux habiles ingénieurs à l'École d'application de Metz, et dans lequel on trouve une foule d'expériences du plus grand intérêt, parce qu'elles sont nouvelles, et parce qu'elles ont été dirigées et décrites avec une précision qui ne laisse rien à désirer.

Dans l'une de ces expériences, la veine sort par un orifice vertical, percé en minces parois, de forme carrée, ayant 20 centimètres de côté, sous une charge de $1_m,68$, prise au dessus de la base de l'orifice.

Les résultats en sont représentés dans les *figures* 131, 132, 133 et 134. La *figure* 131 est la section de l'orifice, et les *figures* 132, 133 et 134 représentent les sections de la veine par des plans verticaux parallèles à l'orifice, et pour des distances qui sont respectivement de 20, 30 et 40 centimètres.

La lettre H indique partout la partie supérieure de la veine. En comparant d'abord la *figure* 131 à la *figure* 134, l'on reconnaît le phénomène de l'*inversion de la veine*, c'est-

à-dire que vis-à-vis les angles de l'orifice sont les milieux des côtés de la veine, et réciproquement vis-à-vis les angles de la veine sont les milieux des côtés de l'orifice. Cette inversion n'est pas subite : elle se fait par degrés, comme on peut le voir sur les *figures* 132 et 133, qui représentent les sections faites à 20 et à 30 centimètres. A une petite distance de l'orifice les angles du carré disparaissent et sont remplacés par de petites facettes sensiblement planes, tandis que les côtés du carré s'infléchissent en dedans et paraissent un peu concaves lorsqu'on les regarde du dehors. A mesure que la veine s'éloigne de l'orifice, les facettes s'élargissent de plus en plus et se creusent à leur tour, tandis que les côtés diminuent; de telle sorte qu'à 20 centimètres de distance (*Fig.* 132) la section de la veine est octogonale : ses huit côtés sont presque égaux et également infléchis vers le centre; seulement on remarque en B, à la partie inférieure, une irrégularité singulière : c'est une arête saillante de rebroussement vers le milieu du côté. Au delà de 20 centimètres ces effets continuent dans le même sens; et à 30 centimètres (*Fig.* 133), les faces correspondantes aux côtés de l'orifice ont disparu complètement, celle d'en haut et celle d'en bas se sont arrondies, tandis que les deux latérales se sont creusées d'une manière assez bizarre. Enfin, à 40 centimètres toutes les arêtes de rebroussement s'effacent, et la section de la veine n'a plus que quatre côtés un peu courbés en dedans et sensiblement égaux. Cette figure se conserve au delà de 40 centimètres, seulement; les faces se creusent davantage et les pointes deviennent plus saillantes.

Le maximum de contraction, ou plutôt la section contractée, se trouve à 30 centimètres : c'est la section de la *figure* 133. Sa surface est seulement les 0,56 de celle de l'orifice; c'est-à-dire que pour cette veine le coefficient de contraction est 0,56.

Quand les orifices ne sont pas circulaires, les points de la

surface de la veine, qui sont les plus rapprochés de l'axe, et qui forment, à proprement parler, la section contractée, se trouvent en général sur une courbe à double courbure.

Plusieurs physiciens ont essayé de déterminer, soit directement, soit indirectement, le rapport qui existe entre la section contractée et la section de l'orifice, et tous s'accordent à conclure que pour les orifices qui ont seulement quelques centimètres de côté ce rapport est compris entre 0,6 et 0,7; c'est-à-dire qu'à son *minimum* la section de la veine n'est plus que les 6 dixièmes, ou les 7 dixièmes, ou environ les $\frac{2}{3}$ de la surface de l'ouverture. C'est ce rapport que l'on appelle *le coefficient de contraction*.

La distance de la section contractée à la face intérieure de la paroi est, en général, un peu plus grande que le rayon de l'orifice quand l'orifice est petit; mais, pour des ouvertures plus grandes, la section contractée paraît s'éloigner davantage.

Ces résultats sont à peu près indépendans de la forme de l'orifice et de la pression sous laquelle le liquide s'écoule. Seulement, pour des orifices dont le diamètre est moindre qu'un centimètre, la contraction est moindre que 0,7; ce qui tient sans doute à ce que l'épaisseur des parois devient alors sensible, et produit un effet analogue à l'effet des ajutages, dont nous parlerons plus loin.

Lorsque la pression qui s'exerce au dessus d'un orifice horizontal est très-faible, il se fait une contraction d'une autre espèce (*Fig.* 139); le liquide remplit encore l'orifice, mais il glisse des parois vers le centre pour former un filet qui est quelquefois très-petit. C'est ce que M. Hachette appelle une *veine secondaire*.

La contraction de la veine résulte de la convergence des divers filets fluides qui la composent. Si toutes les molécules se présentaient à l'orifice avec des vitesses parallèles à l'axe de la veine, il n'y aurait point de contraction, parce qu'il n'y aurait point de raison pour qu'elles fussent déviées de

la ligne directe de leur mouvement; mais le liquide, appelé par l'écoulement, et poussé par la pression, se précipitant vers l'orifice dans toutes les directions possibles, il faut bien que la convergence de ces vitesses se manifeste au dehors par un rétrécissement. Cette cause de la contraction ne peut être qu'indiquée; le calcul ne saurait y atteindre.

La division de la veine à une certaine distance de l'orifice n'est pas seulement produite par la présence de l'air; elle a lieu dans le vide, et elle résulte de l'accélération due à la pesanteur. Deux molécules qu'on laisserait tomber du même point, à une seconde d'intervalle, seraient, au point de départ, à 15 pieds l'une de l'autre; mais, après trois secondes, elles seraient à 65 pieds de distance, et après une minute, elles seraient à 1785 pieds : c'est là précisément ce qui arrive aux différentes parties du liquide qui composent la veine. Deux molécules se suivent en passant par l'orifice, et après un certain temps, la première prend une avance sensible sur la seconde.

109. *Vérification expérimentale des lois de l'écoulement.* —L'appareil à flotteur de M. de Prony est un des plus commodes que l'on ait employés jusqu'à ce jour, dans les recherches exactes sur les mouvemens des fluides. Pour vérifier la première loi, ou le théorème de Torricelli, on adapte à la plaque (*Fig.* 129 et 130) un orifice en mince paroi d'une grandeur connue, d'un centimètre, par exemple; on mesure la hauteur du niveau au dessus de son centre, et on observe la *dépense* pendant un temps très-exactement déterminé. Cette dépense étant connue et évaluée en litres, il est très-facile d'en déduire le nombre L des litres qui se sont écoulés en 1″; alors on peut considérer ce volume comme un cylindre qui est passé par l'orifice, à peu près comme un fil passe à la filière, et dont la base est par conséquent la surface S de la veine contractée, tandis que sa longueur est l'espace parcouru en 1″, c'est-à-dire la vitesse V de l'écoulement. D'où l'on déduit :

$$SV = L, \text{ ou } V = \frac{L}{S}$$

C'est la vitesse expérimentale, ou la vitesse effective.

D'une autre part, la vitesse théorique, donnée par le théorème, est :

$$V = \sqrt{2gh}$$

h étant la hauteur du niveau, au dessus du centre de l'orifice.

C'est de l'égalité de ces deux vitesses que dépend la vérité du théorème de Torricelli. Comme il est très-difficile de mesurer directement le diamètre de la veine contractée pour en déduire sa surface S, on trouve en général de petites différences; tantôt la vitesse effective est plus grande que la vitesse théorique, tantôt elle est plus petite: mais, pour les petits orifices, les deux résultats sont si voisins, qu'il suffit d'augmenter ou de diminuer un peu la valeur de S pour les rendre tout-à-fait identiques; c'est même de cette manière que l'on a déterminé la valeur de la contraction de la veine. Ainsi, dans ce cas, le théorème de Torricelli paraît vrai; il donne la vitesse des molécules liquides qui s'écoulent, mais seulement la vitesse dont elles sont animées à l'instant où elles traversent la section contractée; avant et après cet instant elles ont une moindre vitesse, puisque la section de la veine offre une plus grande surface. Pour les grands orifices, MM. Poncelet et Lesbros ayant mesuré avec une grande précision, et la section contractée et la dépense dans un temps donné, il leur a été facile d'en déduire rigoureusement la vitesse effective, et leurs résultats prouvent que, dans ce cas, le théorème de Torricelli ne donne pas exactement la vitesse du liquide dans la section contractée.

Il est facile de voir comment les autres lois de l'écoulement peuvent être vérifiées, au moyen du même appareil, et comment on peut constater aussi que la courbure du jet est une *parabole*, dont l'amplitude augmente avec la vitesse initiale.

110. *Des ajutages, et de leur influence sur l'écoulement.* — On appelle *ajutages* des tuyaux de diverses formes, ou des plaques courbes, percées de diverses manières, qui s'ajustent aux orifices en minces parois, pour donner passage au liquide qui s'écoule.

Le plus simple des ajutages est celui qui a la forme exacte que prend la veine, depuis l'orifice jusqu'à la section contractée. Lorsqu'il est travaillé avec soin et que sa surface intérieure est bien polie, il n'exerce aucune influence sur la dépense.

Une paroi courbe, percée d'un orifice, ne donne pas la même dépense qu'une paroi plane, percée d'un orifice de même grandeur : elle donne une dépense plus grande quand sa concavité est tournée vers l'intérieur (*Fig.* 136), et une dépense moindre quand elle est tournée vers l'extérieur (*Fig.* 137).

Dans les *ajutages cylindriques* de même diamètre que les orifices en minces parois auxquels ils sont appliqués, il se produit un phénomène singulier : tantôt la veine fluide reste *libre* et passe dans l'ajutage sans le toucher, tantôt elle devient *adhérente*, et l'écoulement se fait à *gueule bée*, c'est-à-dire à plein tuyau. Dans le premier cas, la présence de l'ajutage n'a d'influence ni sur la vitesse ni sur la dépense; il ne peut produire aucun effet, puisqu'il n'a aucun point de contact avec le liquide. Dans le second cas, l'adhérence qui s'établit entre la surface de la veine et les parois de l'ajutage détermine une augmentation de vitesse et une augmentation de dépense. La dépense du premier cas est à celle du second comme 100 est à 133, pourvu toutefois que le diamètre de l'ajutage soit à peu près le quart de sa longueur. Ce phénomène dépend de plusieurs causes, et surtout de la pression : sous de faibles charges, la veine est toujours adhérente, même pour les ajutages très-courts; sous de grandes pressions, la veine reste libre; et sous des pressions intermédiaires on peut à volonté produire l'écou-

lement à veine libre ou à veine adhérente; il suffit d'un léger obstacle pour établir l'adhérence, et il suffit quelquefois du moindre choc pour que la veine se détache des parois de l'ajutage et coule librement.

Quand l'adhérence est établie, la veine fluide se contracte dans l'ajutage, comme elle ferait à l'air libre (*Fig.* 121); on peut s'en assurer en faisant l'expérience avec un tube de verre, et l'on peut s'en assurer encore en donnant à l'ajutage la forme elle-même de la veine contractée (*Fig.* 122); avec ce rétrécissement, la dépense est encore 133, comme elle était auparavant.

Un *ajutage conique* peut donner une dépense encore plus grande que l'ajutage cylindrique : il paraît que l'on obtient la plus grande dépense possible, en prenant deux troncs de cône opposés (*Fig.* 123), de telle sorte que $vv'ss'$ prenne exactement la forme de la veine, que $m\,n$ égale trois fois $o\,m$, et que TT' soit les $\frac{17}{8}$ de ss'. Alors la dépense de l'orifice étant représentée par 100, celle de l'ajutage s'élève à peu près à 150.

S'il y a des ajutages qui augmentent la dépense, il est très-facile d'en construire aussi qui la diminuent dans un très-grand rapport. Tout renflement dans un ajutage conique ou cylindrique produit une diminution de vitesse; les *réflexions*, les *remous*, les chocs des molécules animées de mouvemens contraires, produisent une grande complication de phénomènes, et en dernier résultat une grande diminution dans la dépense. Les varices peuvent être assimilées à des renflemens de cette espèce, et s'il est difficile d'analyser leur influence complète sur les phénomènes de la vie, il est du moins permis de conclure que, dans tous les cas, elles retardent la vitesse de la circulation.

C'est surtout aux recherches de Bossut, de Dubuat, de Venturi, de M. de Prony et de M. Hachette, que nous devons les résultats les plus nouveaux du mouvement des liquides, soit par les orifices en minces parois, soit par les ajutages.

111. *De l'unité de mesure dans la distribution des eaux.* — L'unité de mesure, pour les eaux courantes, est connue sous le nom de *pouce de fontainier* ou *pouce d'eau*. C'est la quantité d'eau qui coule, en une minute, par un orifice circulaire d'un pouce de diamètre, percé dans une paroi verticale, avec une charge d'eau de sept lignes sur le centre de l'orifice, ou d'une ligne au dessus de son point culminant. Le volume d'eau qui s'écoule dans de telles circonstances est de 14 pintes anciennes de Paris, ou 672 pouces cubes par minute; ce qui revient à $19,2^{\text{mèt. cub.}}$ en 24 heures. Un demi-pouce d'eau est la quantité d'eau qui s'écoule par un orifice d'un demi-pouce de diamètre, dont le centre supporte également une pression de 7 lignes : d'où il résulte qu'en volume ou en poids le demi-pouce est véritablement le quart du pouce; car sous la même pression un orifice d'un diamètre moitié donne une dépense qui n'est que le quart. Une *ligne d'eau* n'est, par la même raison, que la 144e partie du pouce, ou $\frac{19,2^{\text{m c.}}}{144}$ en 24 heures.

Il résulte de ce que nous avons vu sur les ajutages, qu'un propriétaire auquel on accorde une certaine quantité d'eau, et par conséquent un orifice en mince paroi d'une certaine grandeur, pourrait tirer du même orifice un volume d'eau une fois et demie plus grand; ainsi, dans les *concessions*, il importe non-seulement de régler le diamètre de l'ouverture, mais encore de définir l'espèce d'ajutage que l'on peut employer.

Il paraît qu'à Paris la dépense journalière est d'environ 10 mille mètres cubes; ce qui fait à peu près 15 litres par tête.

112. *Des jets d'eau.* — Il y a des jets d'eau qui s'élèvent verticalement de bas en haut, et il y en a d'autres qui s'élèvent en gerbes, suivant des paraboles de diverses amplitudes. Les orifices qui donnent naissance aux jets verticaux sont percés dans des parois horizontales, et ceux qui donnent naissance aux jets paraboliques sont percés dans des

parois diversement inclinées. Dans tous les cas, la direction du jet est produite par la pesanteur, qui est toujours verticale, et par la pression ou la force impulsive, qui est toujours perpendiculaire à la paroi. D'après le théorème de Torricelli (107), les molécules liquides ayant à l'orifice la même vitesse que si elles fussent tombées d'une hauteur égale à la hauteur du niveau du liquide dans le réservoir, on voit que cette vitesse, dirigée de bas en haut, serait précisément capable de faire remonter toutes les molécules usqu'à la hauteur de ce niveau, d'où elles sont censées descendues (40). Ainsi, la hauteur du jet vertical serait toujours égale à l'élévation du niveau au dessus de l'orifice. Mais il y a plusieurs causes qui empêchent les eaux jaillissantes d'atteindre à cette hauteur théorique; elles éprouvent des frottemens contre les parois des tuyaux qui les amènent depuis le réservoir jusqu'à l'orifice et contre l'orifice lui-même dont elles rasent les parois avec une grande vitesse; elles éprouvent la résistance de l'air atmosphérique, et enfin les eaux qui retombent du point le plus élevé du jet retombent sur les eaux ascendantes, et leur enlèvent du mouvement. Pour réduire toutes ces résistances à leurs moindres valeurs, on a coutume de suivre dans la pratique les règles suivantes :

1°. On donne aux tuyaux de conduite un diamètre qui dépend de leurs longueurs, de la grandeur de l'orifice et de la hauteur du réservoir. Le diamètre pourra être calculé par les formules que nous donnerons tout à l'heure sur les tuyaux de conduite. On s'arrange pour que la vitesse de l'eau dans les tuyaux soit tout au plus de 2 ou 3 décimètres par seconde.

2°. On fait l'orifice circulaire et on le perce en *mince paroi* dans une plaque que l'on appelle la *platine*. Quand on peut se dispenser de recourber le tuyau, la platine est ajustée vers son extrémité; elle forme une partie de sa paroi latérale supérieure. Quand on est forcé de recourber le tuyau,

on le recourbe en haut, en l'arrondissant, et alors la platine en forme l'extrémité. La platine est plane ou courbée en forme de calotte convexe, suivant que l'on veut avoir un jet vertical, ou une gerbe à plusieurs jets paraboliques.

Tout ajutage, cylindrique ou conique, donne un jet moins élevé que les orifices en minces parois.

Ces conditions étant remplies, on admet, d'après les expériences de Mariotte, que le jet s'élève à une hauteur de 5 pieds pour une hauteur de réservoir de 5 pieds 1 pouce; et qu'en général, pour avoir la hauteur du réservoir, il faut, à la hauteur H du jet, évaluée en pieds, ajouter autant de pouces qu'il se trouve d'unités dans $\frac{H}{5}$ élevé au carré. Ainsi un jet de 100 pieds suppose un réservoir de 100 pieds, plus 400 pouces, ou enfin de 133 pieds 4 pouces.

113. *Des tuyaux de conduite.* — La conduite des eaux est un point important d'économie publique et d'économie industrielle; mais en même temps, c'est une question d'hydraulique qui présente de grandes difficultés. Quelques centimètres de plus ou de moins, dans le diamètre des tuyaux qui distribuent les eaux dans une grande ville, correspondent à un capital de plusieurs millions, et il faut remplir la double condition de les faire assez larges, pour qu'ils fournissent toute la quantité d'eau nécessaire, et assez étroits pour qu'ils coûtent le moins possible. Beaucoup d'ingénieurs habiles ont fait sur ce sujet des recherches théoriques et expérimentales, et les travaux récens de M. de Prony, de M. Girard et de M. Navier ont jeté un grand jour sur cette branche de l'hydraulique. Nous nous contenterons de rapporter ici les résultats qui peuvent être d'une application plus usuelle et plus immédiate. M. de Prony est parvenu à la formule suivante pour l'écoulement de l'eau dans les tuyaux de fonte, dont se composent les conduites :

$$U = 26{,}79 \sqrt{\frac{D\,H}{L}}$$

D est le diamètre du tuyau;

L est sa longueur;

H est la hauteur du niveau de l'eau dans le réservoir au dessus de l'extrémité du tuyau par laquelle l'eau s'écoule. Si cette extrémité était elle-même submergée, il faudrait retrancher sa profondeur au dessous de l'eau.

U est la vitesse de l'eau à l'orifice ou dans toute la longueur du tuyau, ce qui est la même chose; car on suppose qu'il a partout le même diamètre.

Pour toutes ces grandeurs, l'unité de mesure est le mètre.

Pour appliquer cette formule, il faut que $\frac{D}{L}$ ne dépasse pas $\frac{1}{100}$, c'est-à-dire que la longueur du tuyau soit au moins de cent fois son diamètre; et il faut encore que le diamètre ne soit pas lui-même très-petit : s'il n'avait que quelques millimètres ou même 1 centimètre, la formule donnerait sans doute des résultats trop forts. Dans ces limites, elle a été vérifiée par M. de Prony avec tant de soin que l'on peut la regarder comme très-exacte; elle s'accorde avec l'expérience, pour des conduites qui ont jusqu'à 2280 mètres de longueur. Il nous a semblé nécessaire de former, au moyen de cette formule, un tableau contenant les résultats dont on peut avoir le plus souvent besoin dans la pratique.

La première colonne verticale contient les valeurs de H ou les pressions qui s'exercent sur l'orifice d'écoulement; elles vont en croissant de 2 décimètres en 2 décimètres, depuis 2 décimètres jusqu'à 10 mètres.

La première colonne horizontale contient les valeurs de $\frac{D}{L}$ ou les rapports du diamètre du tuyau à sa longueur:

TABLE DES VITESSES DE L'EAU

	0,001	0,0015	0,002	0,0025	0,003	0,0035	0,004	0,0045	0,005
0,2	0,379	0,464	0,536	0,599	0,656	0,709	0,758	0,804	0,847
0,4	0,536	0,656	0,758	0,847	0,928	1,002	1,072	1,137	1,198
0,6	0,656	0,804	0,928	1,038	1,137	1,228	1,312	1,392	1,467
0,8	0,758	0,928	1,072	1,198	1,312	1,418	1,515	1,607	1,694
1,0	0,847	1,038	1,019	1,340	1,467	1,585	1,694	1,797	1,894
1,2	0,928	1,137	1,312	1,467	1,607	1,736	1,856	1,969	2,075
1,4	1,002	1,228	1,418	1,585	1,736	1,875	2,005	2,126	2,241
1,6	1,072	1,312	1,515	1,694	1,856	2,005	2,143	2,273	2,396
1,8	1,137	1,392	1,607	1,797	1,969	2,126	2,273	2,411	2,542
2,0	1,198	1,467	1,694	1,894	2,075	2,241	2,396	2,542	2,679
2,2	1,256	1,539	1,777	1,987	2,176	2,351	2,513	2,666	2,810
2,4	1,312	1,607	1,856	2,075	2,273	2,455	2,625	2,784	2,935
2,6	1,366	1,673	1,932	2,160	2,366	2,556	2,732	2,898	3,055
2,8	1,418	1,736	2,005	2,241	2,455	2,652	2,835	3,007	3,170
3,0	1,467	1,797	2,075	2,320	2,542	2,745	2,935	3,113	3,281
3,2	1,515	1,856	2,143	2,396	2,625	2,835	3,031	3,215	3,389
3,4	1,562	1,913	2,209	2,470	2,706	2,922	3,124	3,314	3,493
3,6	1,607	1,969	2,273	2,542	2,784	3,007	3,215	3,410	3,594
3,8	1,651	2,023	2,335	2,611	2,860	3,089	3,303	3,503	3,693
4,0	1,694	2,075	2,396	2,679	2,935	3,170	3,389	3,594	3,789
4,2	1,736	2,126	2,455	2,745	3,007	3,248	3,472	3,683	3,882
4,4	1,777	2,176	2,513	2,810	3,078	3,325	3,554	3,770	3,974
4,6	1,817	2,225	2,570	2,873	3,147	3,399	3,634	3,854	4,063
4,8	1,856	2,273	2,625	2,935	3,215	3,472	3,712	3,937	4,150
5,0	1,894	2,320	2,679	2,995	3,281	3,544	3,789	4,018	4,236
5,2	1,932	2,366	2,732	3,055	3,346	3,614	3,864	4,098	4,320
5,4	1,969	2,411	2,784	3,113	3,410	3,683	3,937	4,176	4,402
5,6	2,005	2,455	2,835	3,170	3,472	3,751	4,010	4,253	4,483
5,8	2,040	2,499	2,885	3,226	3,534	3,817	4,081	4,328	4,562
6,0	2,075	2,542	2,935	3,281	3,594	3,883	4,150	4,402	4,640
6,2	2,109	2,584	2,983	3,335	3,654	3,946	4,219	4,475	4,717
6,4	2,143	2,625	3,031	3,389	3,712	4,010	4,286	4,546	4,792
6,6	2,176	2,666	3,078	3,441	3,770	4,072	4,353	4,617	4,867
6,8	2,209	2,706	3,124	3,493	3,826	4,133	4,418	4,686	4,940
7,0	2,241	2,745	3,170	3,544	3,882	4,193	4,483	4,755	5,012
7,2	2,273	2,784	3,215	3,594	3,937	4,253	4,546	4,822	5,083
7,4	2,305	2,823	3,259	3,644	3,992	4,311	4,609	4,889	5,153
7,6	2,335	2,860	3,303	3,693	4,045	4,369	4,671	4,954	5,222
7,8	2,366	2,898	3,346	3,741	4,098	4,426	4,732	5,019	5,291
8,0	2,397	2,935	3,389	3,789	4,150	4,483	4,792	5,083	5,358
8,2	2,426	2,971	3,431	3,836	4,202	4,539	4,852	5,146	5,425
8,4	2,455	3,007	3,472	3,882	4,253	4,594	4,911	5,209	5,490
8,6	2,484	3,043	3,513	3,928	4,303	4,648	4,969	5,270	5,555
8,8	2,513	3,078	3,554	3,974	4,353	4,702	5,026	5,331	5,620
9,0	2,542	3,113	3,594	4,018	4,402	4,755	5,083	5,391	5,683
9,2	2,570	3,147	3,634	4,063	4,451	4,807	5,139	5,451	5,746
9,4	2,597	3,181	3,673	4,107	4,499	4,859	5,195	5,510	5,808
9,6	2,625	3,215	3,712	4,150	4,546	4,911	5,250	5,568	5,869
9,8	2,652	3,248	3,751	4,193	4,594	4,962	5,304	5,626	5,930
10,0	2,679	3,281	3,789	4,236	4,640	5,012	5,358	5,683	5,990

QUI S'ÉCOULE DANS LES TUYAUX.

0,0055	0,006	0,0065	0,007	0,0075	0,008	0,0085	0,009	0,0095	0,01
0,889	0,928	0,966	1,002	1,038	1,072	1,105	1,137	1,168	1,198
1,256	1,312	1,366	1,418	1,467	1,515	1,562	1,607	1,651	1,694
1,539	1,607	1,673	1,736	1,797	1,856	1,913	1,969	2,023	2,075
1,777	1,856	1,932	2,005	2,075	2,143	2,209	2,273	2,335	2,396
1,987	2,075	2,160	2,241	2,320	2,396	2,470	2,542	2,611	2,679
2,176	2,273	2,366	2,455	2,541	2,625	2,706	2,784	2,860	2,935
2,351	2,455	2,556	2,652	2,745	2,835	2,922	3,007	3,090	3,170
2,513	2,625	2,732	2,835	2,935	3,031	3,124	3,215	3,303	3,389
2,666	2,784	2,898	3,007	3,114	3,215	3,314	3,410	4,503	3,594
2,810	2,935	3,055	3,170	3,281	3,389	3,493	3,594	3,693	3,789
2,947	3,078	3,204	3,325	3,441	3,554	3,663	3,770	3 873	3,974
3,078	3,215	3,346	3,472	3,594	3,712	3,826	3,937	4,045	4,156
3,204	3,346	3,483	3,614	3,741	3,864	3,983	4,098	4,210	4,320
3,325	3,472	3,614	3,751	3,882	4,010	4,133	4,253	4,369	4,483
3,441	3,594	3,741	3,882	4,018	4,150	4,278	4,402	4,523	4,640
3,554	3,712	3,864	4,010	4,150	4,286	4,418	4,546	6,671	4,792
3,663	3,826	3,983	4,133	4,278	4,418	4,554	4,686	4,825	4,940
3,770	3,937	4,098	4,253	4,402	4,546	4,686	4,822	4,954	5,083
3,873	4,045	4,210	4,369	4,523	4,671	4,815	4,954	5,090	5,222
3,974	4,156	4,320	4,483	4,640	4,792	4,940	5,083	5,222	5,358
4,072	4,253	4,426	4,594	4,755	4,911	5,062	5,209	5,351	5,490
4,168	4,353	4,531	4,702	4,867	5,026	5,181	5,331	5,477	5,620
4,261	4,451	4,632	4,807	4,976	5,139	5,297	5,451	5,600	5,746
4,353	4,546	4,732	4,911	5,083	5,250	5,411	5,568	5,721	5,869
4,443	4,640	4,830	5,012	5,188	5,358	5,523	5,683	5,839	5,990
4,531	4,732	4,925	5,111	5,291	5,464	5,632	5,796	5,954	6,109
4,617	4,822	5,019	5,209	5,391	5 568	5,740	5,906	6,068	6,225
4,702	4,911	5,111	5,304	5,490	5,670	5,845	6,014	6,179	6,340
4,785	4,998	5,202	5,398	5,587	5,771	5,948	6,121	6,289	6,452
4,867	5,083	5,291	5,490	5,683	5,869	6,050	6,225	6,396	6,562
4,947	5,167	5,378	5,581	5,777	5,966	6,150	6,328	6,502	6,671
5,026	5,250	5,464	5,670	5,869	6,062	6,248	6,429	6,606	6,777
5,104	5,331	5,549	5,758	5,960	6,156	6,345	6,529	6,708	6,882
5,181	5,411	5,632	5,845	6,050	6,248	6,441	6,627	6,809	6,986
5,257	5,490	5,715	5,930	6,138	6,340	6,535	6,724	6,908	7,088
5,331	5,568	5,796	6,014	6,225	6,430	6,627	6,820	7,006	7,189
5,405	5,645	5,876	6,097	6,311	6,518	6,719	6,914	7,103	7,288
5,477	5,721	5,954	6,179	6,396	6,606	6,809	7,006	7,198	7,385
5,549	5,796	6,032	6,260	6,480	6,692	6,898	7,098	7,293	7,482
5,620	5,869	6,109	6,340	6,562	6,777	6,986	7,189	7,385	5,577
5,689	5,942	6,185	6,418	6,644	6,862	7,073	7,278	7,477	7,671
5,758	6,014	6,260	6,496	6,724	6,945	7,158	7,366	7,568	7,764
5,826	6,086	6,334	6,573	6,804	7,027	7,243	7,453	7,657	7,856
5,894	6,156	6,407	6,649	6,882	7,108	7,327	7,539	7,746	7,947
5,960	6,225	6,480	6,724	6,960	7,189	7,410	7,625	7,833	8,037
6,026	6,294	6,551	6,779	7,037	7,268	7,492	7,709	7,920	8,126
6,091	6,362	6,622	6,872	7,113	7,347	7,573	7,792	8,006	8,214
6,156	6,430	6,692	6,945	7,189	7,424	7,653	7,875	8,090	8,301
6,220	6,496	6,761	7,017	7,263	7,501	7,732	7,956	8,174	8,387
6,283	6,562	6,830	7,088	7,337	7,577	7,811	8,037	8,257	8,472

ce rapport va croissant de 5 dix-millièmes en 5 dix-millièmes, depuis 1 millième jusqu'à 1 centième.

Au croisement d'une colonne horizontale et d'une colonne verticale se trouve la valeur de U ou la vitesse d'écoulement correspondante aux nombres qui sont en tête des deux colonnes.

Par exemple, si on veut avoir la vitesse d'écoulement sous une pression de 5,4 mètres par un tuyau dont le diamètre, divisé par la longueur, donne 0,0045, on suivra la colonne horizontale qui commence par 5,4 jusqu'à ce qu'elle coupe la colonne verticale commençant par 0,0045; le nombre 4,176 qui se trouve au croisement indique que, dans ces circonstances, la vitesse d'écoulement est, par seconde, de 4 mètres et 176 millimètres.

Pour des nombres qui ne seraient compris ni dans la colonne verticale des pressions, ni dans la colonne horizontale des rapports du diamètre à la longueur, il faudrait *intercaler* par les méthodes ordinaires,

On peut encore résoudre le problème suivant : étant donnés, la hauteur H d'un réservoir, la longueur L de la conduite, et le nombre M de mètres cubes que l'on veut avoir par seconde, trouver le diamètre du tuyau capable de fournir cette dépense; il suffira de mettre pour H, L et M, leurs valeurs dans la formule :

$$D = 0{,}1865 \sqrt[5]{\frac{L\,M^2}{H}}$$

Le résultat sera, en mètres, la valeur du diamètre cherché.

114. *De l'écoulement des liquides par les tubes très-fins.* —M. Girard a fait des expériences très-curieuses sur ce sujet; nous regrettons de n'en pouvoir ici donner que les résultats généraux.

Les liquides qui ne peuvent pas *mouiller* la substance

solide des tubes cessent de s'écouler sous une pression plus ou moins considérable, suivant le diamètre du tube, et suivant sa longueur. Par exemple, sous une pression de $9^{mm},5$, le mercure a cessé de couler dans un tube de verre de $1^{mm},12$ de diamètre, et de 357 millimètres de longueur. La somme des résistances qui s'exercent contre les parois, sur cette longueur de 357 millimètres, est alors égale à la force impulsive qui résulte d'une pression de $9^{mm},5$: il serait important de connaître la loi de ce phénomène.

Les liquides qui mouillent les tubes s'écoulent avec la même vitesse, soit qu'on plonge l'extrémité du tube dans un liquide de même nature, en tenant compte de la pression, soit qu'on la laisse libre pour que l'écoulement se fasse dans l'air.

Dans les tubes qui peuvent être mouillés, l'augmentation de température accélère la vitesse dans une proportion considérable : l'eau qui coule dans un tube de verre de $1^{mm},767$ de diamètre, et de 939^{mm} de longueur sous une pression de 182^{mm}, coule, par exemple, quatre fois plus vite, quand elle est voisine du point d'ébullition, que quand elle est voisine du point de congélation. La température de moindre vitesse est la température de la glace, et non pas la température du maximum de densité. Dans les tubes qui ne peuvent pas être mouillés, l'augmentation de température n'accélère pas la vitesse.

Sous des pressions égales, et dans des tubes de même dimension, les divers liquides prennent à la même température des vitesses très-différentes; le rapport de ces vitesses varie avec la température.

M. Dubuat est, je crois, le premier qui ait observé l'influence de la chaleur sur la vitesse de l'écoulement; ensuite M. Gerstner a fait sur ce sujet un grand nombre d'expériences qui ont été publiées en 1800 dans les *Annales* de Gilbert. Ces résultats sont curieux; mais ils ne suffisent pas

pour conclure, comme fait M. Gerstner, que, si la chaleur donne plus d'activité à la végétation et à la vie, c'est seulement parce qu'elle favorise la circulation dans les vaisseaux capillaires des plantes et des corps vivans.

115. *Des injections anatomiques.* — Il y a dans l'organisation des corps vivans, pour la circulation du sang ou pour celle des autres fluides, des vaisseaux tellement nombreux et tellement déliés que l'œil le plus exercé ne peut en suivre la trace, au milieu des tissus où ils vont se ramifier et se subdiviser à l'infini. Pour les rendre perceptibles, on a imaginé depuis long-temps d'y injecter diverses substances : tantôt des substances liquides et vivement colorées, tantôt des substances susceptibles de se coaguler par le refroidissement. L'appareil le plus commode pour ces opérations délicates paraît être celui de M. Duméril; il se compose d'un long tube vertical d'un ou deux centimètres de diamètre, qui sert de réservoir; d'un second tube de quelques millimètres de diamètre, et de quelques centimètres de longueur, qui s'ajuste au bas du premier pour établir la communication; d'un tuyau de gomme élastique fortement attaché à l'extrémité du second tube et servant à diriger le jet; enfin d'un petit bec qui termine le tuyau de gomme et qui sert en quelque sorte d'entonnoir pour faire passer le liquide dans les vaisseaux les plus déliés; ce petit bec est un tube de verre effilé à la lampe. La pression est déterminée par la hauteur du liquide dans le réservoir, et pour modérer la vitesse de l'écoulement, il suffit de serrer entre ses doitgts le tuyau flexible de gomme élastique.

116. *Des pressions latérales qu'exercent les liquides en mouvement.* — Un liquide qui coule dans des ajutages ou dans des tuyaux, exerce toujours contre leurs parois une moindre pression que s'il était en repos. Daniel Bernouilli exprime cette pression qui a lieu pendant le mouvement par H—H'.

Pour comprendre cette formule, considérons la vitesse

effective qui anime les molécules liquides dans la section perpendiculaire à l'axe du tuyau ou de l'ajutage pour laquelle on veut calculer la pression; cette vitesse est due, par le théorème de Torricelli, à une certaine hauteur de niveau qui est la valeur de H'. Concevons ensuite que le tuyau soit coupé suivant cette même section, de telle sorte qu'elle reste ouverte et devienne elle-même l'orifice d'écoulement : alors le liquide prendrait une certaine vitesse, et la valeur de H désigne la pression qui serait capable de la produire. Cette valeur de H n'est pas nécessairement égale à la hauteur réelle du niveau au dessus du centre de la section; elle peut être un peu plus petite par l'effet de la contraction, ou un peu plus grande par l'influence des ajutages. Si H' se trouve égale à H, la pression est nulle et les parois ne supportent absolument aucun effort. Si H' est plus grand que H, la pression est négative, c'est-à-dire qu'au lieu d'une pression sur la paroi du tuyau il s'exerce une véritable *succion*. Les expériences par lesquelles on a vérifié jusqu'à présent la formule de Bernouilli ne sont ni assez nombreuses ni assez précises pour qu'on puisse l'employer avec une entière confiance. Cependant le phénomène de succion qu'elle indique est un fait remarquable sur lequel il ne peut rester aucun doute; il fut constaté par Bernouilli lui-même, et depuis il a été étudié plus particulièrement par Venturi et par M. Hachette. Voici les circonstances dans lesquelles il se produit. Nous avons vu que par un ajutage cylindrique, quand la veine est adhérente, la dépense est plus grande que par un orifice en mince paroi de même diamètre; donc la vitesse effective est plus grande que la vitesse théorique, et par conséquent H' est plus grand que H; ce qui doit produire le phénomène de la succion. En effet, si l'on perce l'ajutage d'une petite ouverture latérale pour y mettre un tube recourbé tel que *xy* (*Fig.* 120), le liquide monte dans l'intérieur de ce tube, et la hauteur de la colonne soulevée donne la mesure de la force d'aspiration.

La dépense étant plus grande encore par l'ajutage à double cône qui est représenté *figure* 123, et dont nous avons donné les dimensions (110), l'aspiration doit être encore plus grande, son *maximum* doit être en ss' à la section de la veine contractée, et à partir de là elle doit diminuer à mesure que l'on s'approche de l'extrémité TT'. C'est ce qui est complètement vérifié par les expériences de Venturi : l'ajutage (*Fig.* 123) avait 88 lignes de longueur, trois tubes verticaux d'ascension venaient s'ouvrir, le premier, à 10 lignes de l'origine, sur la section contractée, le deuxième, à 36 lignes, et le troisième à 62 lignes ou à 26 lignes de l'extrémité TT'; dans le premier, le mercure est monté à 53 lignes, il est monté dans le second à 20,5 lignes; et dans le troisième, seulement à 7 lignes. Ces hauteurs correspondent respectivement à 62 pouces d'eau, à 24 pouces et à 8 pouces. La charge d'eau au dessus de l'ajutage était seulement de 32,5 pouces; ainsi la force de succion soulevait une colonne d'eau presque double de la hauteur de la chute. Quand le tube est assez court, cette colonne soulevée afflue dans l'ajutage, et se mêle à l'eau qui sort du vase pour alimenter l'écoulement. Ces effets singuliers sont représentés d'une manière assez exacte par la formule précédente. Venturi indiquait cet appareil comme un moyen d'élever l'eau à peu de frais.

117. *De la réaction qui est produite par l'écoulement des fluides.* — Concevons un vase de forme cubique, porté sur des roulettes très-mobiles, et posé sur un plan horizontal qui offre peu de frottement. Le vase rempli de liquide restera en repos, parce que toutes les pressions latérales sont égales et contraires. Mais si l'on perce la paroi pour que le liquide jaillisse latéralement, le vase sera repoussé en sens contraire, il y aura un recul semblable au recul des armes à feu ou des fusils à vent (30). Cette réaction est rendue sensible par un appareil que l'on appelle le *tourniquet hydraulique*. Il se compose d'un tube de verre de quelques

millimètres de diamètre, dont on recourbe les bouts, perpendiculairement et en sens opposés, à peu près en forme de z, les deux bouts sont effilés en becs très-fins. Au milieu de ce tube on en soude un autre qui doit servir de réservoir. L'appareil est suspendu à un fil; le réservoir est vertical, les branches sont horizontales, et l'écoulement qui a lieu par les extrémités produit un mouvement circulaire très-rapide.

On a cru long-temps, sur l'autorité de Newton, que le recul de cette espèce était égal au poids d'une colonne liquide ayant pour base la section contractée de la veine qui s'écoule, et pour hauteur la hauteur du niveau. Mais Daniel Bernouilli a démontré que, dans tous les cas découlement, la force de réaction est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base la section contractée de la veine qui s'écoule, et pour hauteur *le double* de la hauteur du niveau. Bernouilli proposait de remonter les fleuves avec des machines fondées sur ce principe, et présentement on en voit sur le Rhône une application qui paraît assez heureuse.

118. *De l'écoulement de l'eau dans les canaux.* — Rien n'est plus variable que la vitesse de l'eau dans les lits des fleuves et des rivières : les pentes plus ou moins rapides, le frottemens latéraux, les accidens du fond et les sinuosités des rivages sont des causes qui modifient sans cesse la marche des filets liquides, et qui produisent les *remous*, les *tournans* et une foule d'autre phénomènes que l'on peut expliquer dans chaque localité, mais qu'il est impossible de calculer d'avance. Les canaux qui ont une pente uniforme, une direction rectiligne et des dimensions constantes présentent des résultats plus simples et plus généraux. Les différentes couches liquides, depuis celle de la surface jusqu'à celle du fond, sont animées de vitesses différentes, et même, dans chaque couche, les filets des bords et celui du milieu ne peuvent pas avoir la même

vitesse, à cause de l'adhérence et du frottement qui ont lieu au contact des parois. De tous les filets d'eau qui passent à chaque instant dans la section perpendiculaire d'un canal, celui qui a la plus grande vitesse est le filet qui se trouve à la surface et au milieu du lit à égale distance des deux bords. Cette vitesse *maximum* peut être déterminée au moyen d'un corps léger que l'on jette sur la surface, et qui prend à peu près le mouvement de l'eau. Or on a constaté par un grand nombre d'expériences que, si tous les filets liquides étaient animés d'une vitesse commune qui fût les 8 dixièmes de la vitesse *maximum*, le volume d'eau qui passerait dans un temps donné serait égal au volume d'eau qui passe dans le même temps, en vertu de toutes les vitesses différentes, dont les molécules sont réellement animées. Il suffit donc, pour avoir la dépense d'eau d'un canal, de multiplier la surface de sa section, par les 0,8 de sa vitesse *maximum*. Cette règle est très-simple, et paraît être suffisamment exacte pour la pratique.

Dans toutes les sections que l'on peut faire perpendiculairement au cours d'un fleuve, il passe la même quantité d'eau dans le même temps; car c'est à cette condition que le *régime est établi*, c'est-à-dire que le niveau reste le même en chaque point, sans qu'il y ait tendance à l'accumulation ni à la dépression. Pour connaître la dépense d'un fleuve, il faudrait donc connaître la quantité d'eau qui passe dans une section quelconque. Cela revient à connaître deux choses, savoir la surface de la section et la vitesse moyenne de tous les filets qui la traversent. Mais la vitesse moyenne n'est plus ici, comme dans les canaux, les 0,8 de la vitesse *maximum*; et il serait impossible de déterminer en général le rapport qui existe entre elles, puisqu'il suffit d'un rehaussement du fond, d'un creux, d'une sinuosité du rivage, ou même d'une autre cause moins apparente, pour en changer la valeur. Ce qu'il y a de plus simple et de plus exact pour jauger un fleuve est donc de le faire passer par

un pertuis dont on connaisse les dimensions et la profondeur au dessous du niveau, ou de le faire passer sur une digue où il forme une nappe dont on puisse connaître la largeur et l'épaisseur.

119. *Divers appareils pour le mouvement des liquides.* — Comme application des principes précédens et du jeu des pressions atmosphériques, nous essaierons de faire connaître quelques machines usuelles. Nous en avons renvoyé la description à la fin du chapitre, pour ne pas interrompre l'exposition générale.

120. *Du siphon.* — Le siphon est un tube recourbé BSB′ (*Fig.* 141), BS est la *courte branche*, SB′ est la *grande branche*, AT est le tube d'aspiration, dont nous verrons plus tard l'usage : pour le moment, nous supposerons qu'il n'y soit pas. Les deux branches étant remplies de liquide, la pression est la même au point B et au point N, qui sont au même niveau; ainsi en B′ elle est plus grande de tout le poids de la colonne NB′. Le liquide s'écoule par la grande branche en vertu de cet excès de pression, et sa vitesse est la même que s'il fût tombé de la hauteur NB′.

La même cause fait continuer l'écoulement avec la même vitesse, tant qu'il y a du liquide en B. Si cette extrémité de la courte branche plonge dans un vase, le vase se vide, et la vitesse d'écoulement est toujours produite par la différence de hauteur des deux branches : en prenant pour hauteur de chacune d'elles la distance du sommet S au niveau du liquide dans lequel elle plonge. Le tube d'aspiration est destiné à *amorcer* le siphon, c'est-à-dire à le remplir de liquide pour le mettre en activité. Les *figures* 147 et 148 représentent des siphons d'une autre espèce dont on devinera facilement les effets; on les appelle des *vases de tantale*.

Le siphon n'est pas seulement d'un usage journalier dans les arts, mais il peut encore être employé avec avantage pour détourner le cours d'une rivière. En 1803, M. Lebrun

fit passer l'eau de la Moselle, de l'amont à l'aval, d'une digue qu'il s'agissait de réparer, au moyen d'un siphon de 8 centimètres de diamètre; la chute était de 1 mètre. Pour amorcer de tels siphons, on les ferme aux deux bouts, et on les remplit d'eau par le sommet.

121. *Fontaine de compression.* — V (*Fig.* 145) est un vase en cuivre à parois très-solides; T un tube qui fait corps avec le robinet R; ces deux pièces sont soudées, et leur ensemble peut se visser sur le col du vase V; *j* est l'ajutage d'écoulement, il se visse au dessus du robinet R : c'est de la grandeur de son orifice que dépend le diamètre du jet; *nn'* est le niveau de l'eau dans le vase. Au moyen d'une pompe foulante qui s'adapte à la place de l'ajutage, au dessus du robinet R, on comprime l'air dans l'espace *nAn'*. Alors la fontaine est chargée, on ôte la pompe, on visse l'ajutage, on tourne le robinet, et le liquide jaillit à une grande hauteur : à une trentaine de pieds, si l'air est seulement comprimé sous deux atmosphères, et à une centaine de pieds, si l'air est comprimé sous cinq ou six atmosphères.

Cet appareil peut être très-utile pour éteindre les incendies dès leur origine.

122. *Fontaine intermittente.* — R (*Fig.* 152) est le réservoir d'eau, *j j'* sont les ajutages d'écoulement : la figure n'en représente que deux; T est *le tube de pression :* son extrémité supérieure s'élève au dessus du niveau de l'eau du réservoir; P est le pied de la fontaine, où se trouve le secret des intermittences : on y distingue une échancrure *e* à l'extrémité inférieure du tube, et une ouverture *v* par laquelle l'eau passe du premier fond sur le second. Quand l'échancrure est à nu, l'air passe dans le tube et vient exercer une pression atmosphérique sur la surface *nn'* de l'eau du réservoir; quand l'échancrure est baignée par l'eau qui s'accumule sur le premier fond, l'air ne peut plus entrer par le tube, et la pression diminue de plus en plus

dans le réservoir. Les ajutages *j* et *j'* peuvent communiquer ou ne pas communiquer avec l'eau de la fontaine, suivant que l'on tourne ou que l'on détourne la virole à laquelle ils sont adaptés ; aussitôt que la communication est établie, l'eau coule par les ajutages, tombe sur le premier fond, et s'accumule au dessus de l'ouverture *v*; cette ouverture laissant passer moins d'eau que n'en donnent les ajutages, le niveau monte de plus en plus, l'échancrure *e* est baignée, la communication de l'air est interceptée, la pression diminue dans le réservoir, et bientôt après, l'écoulement cesse faute d'une pression suffisante. Pendant cette intermittence, l'ouverture *v* laisse passer l'eau du premier fond sur le second, l'échancrure se dégage, la pression de l'air se rétablit, et l'écoulement recommence, pour cesser après un instant, pour recommencer de nouveau, et ainsi de suite. La durée des intermittences dépend des grandeurs relatives de l'ouverture *v* et des ajutages, de la hauteur de l'échancrure, et de la distance des ajutages au niveau de l'eau du réservoir.

En Allemagne, en Angleterre, en Italie, et dans plusieurs provinces de la France, surtout en Languedoc, et près de Pontarlier en Franche-Comté, on trouve des fontaines naturelles qui ont des intermittences comme la fontaine précédente ; mais si le résultat est le même, le principe est très-différent.

123. *Fontaine de Héron.* Cet appareil (*Fig.* 153) se compose de trois vases, un vase supérieur L, un vase moyen M, et un vase inférieur I ; et de trois tubes, le premier *si* descendant du fond du vase supérieur au fond du vase inférieur, le second *im* s'élevant du sommet du vase inférieur au dessus du vase moyen, et le troisième *ms* s'élevant du fond du vase moyen jusqu'à 2 ou 3 décimètres au dessus du vase supérieur ; c'est celui-ci qui forme le jet de la fontaine de Héron. On met de l'eau dans le vase M, au moyen du bouchon B que l'on ferme ensuite ; on met pareillement de

l'eau dans le vase S, on ouvre le robinet r, et le liquide s'élance jusqu'à un point, qui est théoriquement autant élevé au dessus du niveau du vase moyen, que le niveau du vase supérieur est lui-même élevé au dessus du niveau du vase inférieur. Cette pression est en effet celle que supporte l'air qui est enfermé dans le vase inférieur et dans le vase moyen.

La Figure 154 représente une autre fontaine de Héron, dont on on devinera facilement la disposition; il suffit de quelques tubes de verre pour la construire.

C'est avec un appareil construit sur ces principes que l'on fait l'épuisement de l'eau dans les mines de Schemnitz en Hongrie.

MM. Girard avaient imaginé des *lampes hydrostatiques* dans lesquelles l'huile était portée à la mèche par une force ascensionnelle constante, au moyen d'une modification de la fontaine de Héron. Mais les mouvemens d'horlogerie l'emportent, pour cet objet, sur toutes les combinaisons hydrostatiques que l'on a tentées jusqu'à présent.

123. *Lampe de Volta.* — Cet appareil est représenté dans la Figure 155, avec les heureux perfectionnemens que l'on doit à M. Gay-Lussac; il se compose d'un ballon à long col B, renversé dans un vase plus large V, dont il ne touche pas tout-à-fait le fond; la jonction cc' doit être hermétiquement fermée; un cylindre creux de zinc zz' enveloppe le col du ballon; l'eau aiguisée d'acide sulfurique qui remplit le vase V agit sur le zinc, elle se décompose, son hydrogène se dégage, et par la pression croissante qu'il exerce, l'eau est de plus en plus refoulée dans le ballon B, jusqu'à ce que le niveau soit descendu au dessous de la dernière tranche z' du zinc; alors toute action cesse, et l'on a un réservoir rempli d'hydrogène comprimé. En tournant le robinet r le gaz se dégage dans l'air par le tube t, qui doit être très-fin; au même instant, une étincelle électrique en traverse le jet, et le courant du gaz devient un cou-

rant de flamme. Nous verrons plus tard comment se produit ce phénomène, et comment le mélange d'hydrogène et d'air est enflammé par l'électricité.

125. *Pompe aspirante et élévatoire.* — La pompe aspirante (*Fig.* 150) se compose d'un *tuyau d'aspiration* AA′, d'un *corps de pompe* CC′, d'un *piston* PP′, *d'un tuyau d'ascension* SS′, et de trois *soupapes* R, T, L, qui s'ouvrent de bas en haut. La première soupape R est au fond du corps de pompe, la deuxième T est dans l'épaisseur du piston, et la troisième L est au bas du tuyau d'ascension. Le tuyau d'aspiration plonge dans l'eau que l'on veut élever, et la tige du piston passe dans une boîte à étoupe EE′ et dant une boîte à graisse GG′. A l'origine du mouvement, le piston étant soulevé, sa soupape se ferme, et les deux autres R et L s'ouvrent; première par l'air supérieur qui se comprime et s'échappe, la seconde par l'air inférieur qui se dilate et passe sous le piston; la pression diminue dans le tuyau d'aspiration, et l'eau s'y élève par l'effet de la pression extérieure. Arrivé au dessus de sa course, le piston redescend; la soupape inférieure se ferme, l'air se comprime dans le corps de pompe, soulève la soupape du piston, et passe au dessus. En remontant une seconde fois, le piston soulève l'eau un peu plus haut, et en redescendant une seconde fois il chasse une nouvelle quantité d'air. Enfin, après un certain nombre de coups, si la pompe est bien faite, l'eau arrive au dessus de la première soupape, elle monte de plus en plus, soulève elle-même la seconde soupape, et passe au dessus du piston. A partir de cet instant, tout l'air est chassé, et la pompe joue dans l'eau: chaque fois que le piston monte, il soulève toute la colonne d'eau qui est au dessus de lui, et il entraîne celle qui est au dessous; chaque fois qu'il descend, il ferme la première soupape, il ouvre la sienne, et s'en vient prendre par sa base la colonne qu'il avait entraînée, pour la soulever à son tour. L'effort qu'il faut faire pour soulever le piston se compose de deux parties:

l'une est le frottement ; l'autre est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base le piston lui-même, et pour hauteur toute la hauteur de l'orifice par lequel l'eau s'écoule dans l'air.

Pour qu'une pompe soit bonne, il faut que l'eau puisse atteindre à la première soupape R : ainsi la position de cette soupape dépend du degré de raréfaction que l'on peut donner à l'air qui est au dessus d'elle, et ce degré de raréfaction dépend lui-même de l'étendue de la course du piston et de la distance des deux soupapes T et R. Quand cette distance est nulle, le vide est possible, et, à la rigueur, la soupape R pourrait être à 32 pieds de hauteur au dessus du niveau de l'eau qu'il s'agit d'élever. Si cette distance était seulement de 1 décimètre, et que le piston n'eût que 2 décimètres de course, l'air ne pourrait être amené par le jeu de la pompe qu'à une demi-pression atmosphérique, et la soupape R ne pourrait être tout au plus qu'à 16 pieds de hauteur. Il est facile de calculer la relation générale qui existe entre ces divers élémens.

126. *Pompe aspirante et foulante, à corps de pompe alaisé.* —Elle est représentée dans la *fig.* 149. Elle se compose d'un tuyau d'aspiration AA′, d'un tuyau d'ascension ss′, d'un corps de pompe CC′ et d'un piston PP′ ; mais elle a seulement des soupapes R et L d'aspiration et d'ascension ; rien ne passe au travers du piston ni sur son contour, et sa face supérieure est toujours en communication libre avec l'atmosphère.

Quand le piston monte, l'eau est aspirée au dessus de la soupape R, et quand il descend elle est comprimée, presse la soupape R et soulève la soupape L.

127. *Pompe aspirante et foulante sans corps de pompe alaisé.*—Cette pompe est représentée dans la figure 151. Elle diffère de la précédente par la forme et l'ajustement du corps de pompe et du piston. Les deux soupapes R et L du tuyau d'aspiration AA′ et du tuyau d'ascension ss′ sont

aussi un peu différentes; elles présentent une disposition très-heureuse, surtout pour les grandes pressions: la première R se compose de deux clapets inclinés qui viennent *butter* contre les arrêts *a* et *a'* quand ils sont soulevés par l'aspiration, et qui retombent sur le prisme *z* quand ils sont pressés de haut en bas pendant que le piston descend; la seconde L se compose d'un seul clapet incliné. L'ajustement que l'on voit au dessus est en *regard* pour visiter la soupape et la changer au besoin.

Le corps de pompe n'est point alaisé, parce que le piston ne le touche pas.

Le piston est un cylindre de métal parfaitement tourné qui passe dans la boîte à étoupes E E', et dans la boîte à graisse G G'; c'est là qu'est la véritable fermeture de la pompe.

Il est indispensable de ménager un petit conduit pour donner issue à l'air qui se dégage de l'eau et qui pourrait mettre la pompe hors de service en remplissant le corps de pompe. On peut le faire de deux manières, ou en perçant l'épaisseur du corps de pompe, ou en forant le piston dans sa longueur, et ensuite latéralement comme le représente la *figure* 150, en *ryu*, *r* est la vis de pression qui ferme l'ouverture de ce conduit.

M. Martin a établi à Marly des pompes de cette espèce, qui sont construites avec une rare perfection; elles élèvent l'eau à 500 pieds au dessus du niveau de la Seine.

128. *Pompe des Prêtres.* — Dans cette pompe le piston est remplacé par une membrane élastique (*Fig.* 142) qui est arrêtée par ses bords, et qui offre en son milieu une soupape de métal *s'*. Quand la tige *t* soulève la membrane, le liquide est aspiré, et entre par la soupape *s*; au contraire, quand la tige est abaissée, le liquide, comprimé entre les deux soupapes, soulève la soupape *s'* pour passer au dessus du piston élastique.

C'est une pompe de cette espèce qui sert à faire monter

l'huile dans les lampes de Gotten ; on la dispose alors comme dans la *Figure* 143. *cc rr* représente la section verticale d'une petite caisse en cuivre qui est séparée en deux parties par la cloison *ll* ; la partie de droite se subdivise sur sa longueur en trois ou quatre petits compartimens semblables à celui que représente la figure. Une peau très-fine est alternativement soulevée et déprimée au moyen du fil F ; quand elle se soulève, l'huile du réservoir R entre par la soupape *s* ; quand elle se déprime, l'huile est refoulée et passe par la soupape *s'* pour monter dans le tube d'ascension T. Trois compartimens ou trois pompes, ayant leurs soupapes séparées, suffisent pour la continuité du mouvement : l'une est au dessus de sa course, l'autre au milieu, la troisième à la fin, et l'huile est toujours poussée dans le tuyau d'ascension avec une force à peu près égale. C'est un mouvement d'horlogerie qui met en jeu toutes ces pompes.

129. *Presse hydraulique.* — Cette machine offre de si grands avantages dans les exploitations agricoles et industrielles qu'il nous a semblé nécessaire d'indiquer ici les détails de sa construction. Elle est représentée dans les *figures* 217, 218, 219, 220 et 221. Planche 10.

Fig. 221. Élévation générale de la presse.

Fig. 218. Coupe verticale.

Fig. 220. Cuir embouti.

Fig. 219. Pièces qui servent à ajuster le piston de la pompe.

Fig. 217. Détails de la soupape de pression.

Il y a deux parties distinctes dans la presse hydraulique : savoir : une pompe aspirante et foulante qui donne la pression, et un plateau à piston qui la reçoit pour la transmettre immédiatement aux corps que l'on veut presser.

La pompe est vue dans l'élévation en AF (*Fig.* 221), et beaucoup plus en grand dans la coupe verticale, en AF (*Fig.* 218).

Le plateau à piston est vu dans l'élévation en P'P (*Fig.*

221), et beaucoup plus en grand dans la coupe verticale, en P (*Fig.* 218) (ici le plateau P′ est enlevé, il ne reste que le piston).

La pompe donne la pression au piston P au moyen du tuyau *tbu*, *figures* 218 et 221.

En levant le levier L, *figure* 221, on soulève le piston S de la pompe, *figure* 218, l'eau de la bache B, *figure* 221, entre par la pomme d'arrosoir *r*, *figure* 218, soulève la soupape *i* et passe sous le piston S; quand on presse sur le levier L, on fait redescendre le piston S, l'eau est refoulée, elle ferme la soupape *i*, gagne le conduit *z*, *figure* 218, soulève la soupape D et passe dans le tuyau *tbu* pour arriver dans le corps CC′ de la presse, *figures* 218 et 221. Là elle presse fortement le piston P et le force à monter avec le plateau P′, qui presse à son tour les corps qui se trouvent entre sa surface et la plate-forme EF, *figure* 221.

Si la section du piston S est la centième partie de la section du piston P, un effort d'un kilogramme sur le premier produira, de bas en haut sur le second, une pression de 100 kilogrammes. Or, au moyen du levier L, un homme peut aisément exercer sur le piston S un effort de 300 kilogrammes; ainsi le piston peut aisément être poussé avec une puissance de 30,000 kilogrammes.

Tel est le principe fondamental de la presse hydraulique. Nous indiquerons maintenant comment on mesure les pressions et comment on est parvenu à éviter les fuites.

Les pressions se mesurent au moyen de la soupape G, *figure* 218; on en voit les détails dans la *figure* 217. Connaissant le poids *p*, sa distance *yf* au point d'appui *f*, la distance *xf* du point par lequel le levier presse sur la soupape et enfin la section de la soupape, il est facile de calculer la pression qu'elle éprouve de la part du liquide lorsque le levier *fy* est soulevé.

Pour éviter les fuites, on ajuste d'abord avec un soin particulier le piston S; les pièces qui servent à cet usage

sont vues en grand dans la *figure* 219; c'est la même disposition que dans la pompe de Marly, *figure* 151, planche 7. Mais la principale difficulté se trouvait au piston P; c'est Bramah qui l'a résolue par l'heureuse invention du cuir embouti dont on voit une coupe dans la *figure* 220. Ce cuir est disposé en mm', *figure* 218, dans un espace annulaire, pratiqué à cet effet dans le corps CC′ de la presse; il est facile de voir par sa forme et sa disposition qu'il ferme d'autant mieux que la pression est plus forte : car l'effet de la pression est de le pousser en même temps contre le piston P, qu'il embrasse étroitement, et contre les parois de l'espace annulaire.

La vis K sert à la *dépression;* lorsqu'on la détourne, le liquide revient du corps de la presse par le tube *ubt* et s'échappe par l'ouverture *v*.

130. *Bélier hydraulique.* — Cette machine, qui fut découverte en 1797, par Mongolfier, l'inventeur des aérostats, n'est pas moins remarquable par le principe nouveau sur lequel elle repose, que par les nombreux avantages qu'elle peut offrir. Nous essayerons d'abord de faire comprendre le principe de mécanique d'où elle tire sa force motrice. Un corps quelconque, solide ou fluide, étant animé d'une certaine vitesse, imaginons que l'on arrête quelques-unes de ses parties; à l'instant toutes les autres, qui ne sont pas directement arrêtées, vont exercer sur celles-ci des efforts différens : celles qui sont en avant tendront à les entraîner après elles ou à s'en séparer; celles qui sont en arrière, voulant aussi continuer leur route, se précipiteront en vertu de leur vitesse acquise, et se presseront les unes sur les autres en même temps qu'elles presseront les parties immobiles. Une flèche, par exemple, étant animée d'un mouvement rapide, si on l'arrêtait tout à coup par le milieu, la partie antérieure, tendant à entraîner la partie arrêtée, éprouverait une traction dans toute sa longueur, et cet effort pourrait la rompre si la vitesse était assez

grande; au contraire la partie postérieure, tendant à pousser la partie arrêtée, éprouverait une pression dans toute sa longueur, et toutes ses tranches seraient refoulées les unes sur les autres. De même, quand une colonne d'eau est en mouvement dans un tube et que tout à coup un obstacle l'arrête, elle presse cet obstacle en vertu de sa vitesse acquise; la première tranche qui le touche est bientôt arrêtée, et pressée à son tour par la tranche qui vient après, et ainsi *successivement* jusqu'à la tête de la colonne; pendant ce temps, qui est très court, le tuyau supporte un excès de pression latérale, dépendant de son diamètre et de la vitesse de l'eau, et c'est cet excès de pression résultant du mouvement arrêté qui devient la force motrice du bélier hydraulique.

TT′ (*Fig.* 222, *pl.* 10) est un tuyau dans lequel se meut l'eau d'une source avec une vitesse dépendante de la hauteur de la chute; c'est le *corps du bélier*. L'eau s'écoulerait par l'orifice V, s'il n'y avait pas d'obstacle, et gagnerait le niveau NN′, qui est le niveau naturel au dessous de la chute; mais vers cette extrémité du tuyau on ajuste diverses pièces qui forment *la tête du bélier*. S est une soupape dont la densité est double de celle de l'eau; l'eau peut la soulever par sa vitesse, et l'appliquer contre l'ouverture V qui se trouve alors exactement fermée; on l'appelle *soupape d'arrêt*. Quand la soupape S est fermée, l'eau passe par le conduit *z* et s'élève dans le vase en fonte BB′, d'où elle passe par le clapet C, dans la grande cloche en fonte HH′, d'où elle gagne enfin le tuyau d'ascension DEK. Là elle s'arrêterait lorsqu'elle serait parvenue à la hauteur du niveau supérieur de la chute, s'il n'y avait pas une force motrice capable de la pousser plus haut. Mais cette force se développe de la manière suivante : l'eau de la source, ayant acquis assez de vitesse par son écoulement naturel, soulève la soupape S et ferme l'ouverture V; alors la pression latérale résultant du mouvement arrêté exerce

un effort sur tous les points de la paroi du tuyau. Cette pression pousse le liquide en *z*, le clapet C est soulevé et l'eau passe dans la cloche HH′; la durée de cette ascension est un peu prolongée par la réaction élastique de toutes les pièces de l'appareil. Bientôt le clapet C et la soupape S retombent par leur poids, l'un, pour fermer l'ouverture du vase BB′, et l'autre pour ouvrir l'orifice d'écoulement. La série des effets rapides qui se succèdent jusqu'à cet instant, est ce que l'on nomme un *coup de bélier*. Dès que l'écoulement naturel a recommencé, la vitesse s'accélère promptement; la soupape S est de nouveau soulevée, et les mêmes phénomènes se reproduisent. On détermine par des essais la disposition des pièces, et surtout le jeu qu'il faut donner à la soupape S pour obtenir le plus grand effet possible. La limite de hauteur à laquelle on peut élever l'eau par cet appareil dépend du diamètre du tuyau et de la vitesse que l'eau peut prendre en le traversant.

On voit en *a* un piston qui sert à rendre de l'air pour remplacer celui qui est en A, dans le vase BB′, et qui se dissout peu à peu; l'air rentre de lui-même et par le jeu de l'appareil.

Il paraît que dans la pratique le bélier donne plus de 60 pour 100 de la force de la force réelle de l'eau de la source; c'est à peu près ce que peuvent donner les roues *à pots* les mieux construites; les roues *en dessous* ne donnent qu'environ 25 ou 30 pour 100.

CHAPITRE IX.

Du mouvement des Gaz.

131. Les gaz peuvent peuvent s'écouler comme les liquides, par des orifices en minces parois, par des ajutages ou par des tuyaux; ils peuvent s'écouler aussi sous des pressions constantes ou sous des pressions variables. Les appareils au moyen desquels on obtient des écoulemens constans se nomment des *gazomètres*.

132. *Des Gazomètres.*—Lorsqu'on recherche une grande précision, l'écoulement constant du gaz est produit par l'écoulement constant d'un liquide; rien n'est plus commode pour cet usage que le vase de Mariotte. On le dispose alors comme dans la *figure* 128; le grand col du ballon est mastiqué dans le réservoir de gaz; l'eau tombe par l'orifice v; s'il en arrive 20 litres en 1′, il faut que 20 litres de gaz soient chassés dans le même temps par les orifices ou par les tuyaux d'écoulement. Pour appliquer ce principe aux gaz différens de l'air, on les recueille dans de grandes vessies ou dans des ballons de baudruche que l'on enferme dans un second réservoir; l'air qui sort du premier réservoir arrive dans le second, et exerce sur ces membranes élastiques une pression constante qui produit de même un écoulement constant.

Les grands gazomètres de l'éclairage sont construits sur un autre principe: un cylindre à un seul fond est renversé sur une grande citerne remplie d'eau. Ce cylindre est en feuilles minces de métal, et a, par exemple, 10 mètres de diamètre, contient 100 mètres cubes de gaz, et pèse, je suppose, 10000 kilogrammes. Il n'enfonce pas dans l'eau,

puisqu'il est plein de gaz, seulement il presse de tout son poids sur ce gaz intérieur, et le tient à une pression plus forte que la pression atmosphérique. Dans notre hypothèse, cet excès de pression serait de 10000 kilogrammes sur une base de 10 mètres de rayon; ce qui fait à peu près une colonne d'eau de 13 centimètres. Si l'on conçoit maintenant que du fond de la citerne s'élève un tube, qui vienne d'une part s'ouvrir un peu au dessus du niveau intérieur de l'eau pour communiquer avec le gaz du gazomètre, et qui s'en aille d'une autre part se subdiviser en une foule de ramifications terminées par des becs d'éclairage, on verra qu'il suffit de tourner un robinet pour éclairer une grande ville. L'écoulement du gaz sera constant, parce que le gazomètre ne fera qu'une petite perte de poids en s'enfonçant dans l'eau de la citerne; au reste, on peut, avec des contre-poids, lui donner encore plus de régularité ou modérer sa pression. Pour remplir le gazomètre, on ferme le robinet de distribution, et l'on ouvre un autre robinet qui établit la communication entre les cornues où se forme le gaz et le tube vertical qui s'élève du fond de la citerne au dessus du niveau intérieur de l'eau.

133. *Loi de l'écoulement des gaz d'après la théorie de Daniel Bernouilli.* Daniel Bernouilli avait supposé que le théorème de Torricelli s'applique aux gaz comme aux liquides, et, en partant de ce principe, il exprimait la vitesse d'écoulement d'un gaz par la formule suivante :

$$V = \sqrt{\frac{2K(P - P')}{P}}$$

V est la vitesse d'écoulement.

P la pression intérieure.

P' la pression extérieure.

2 K un coefficient constant égal à 155610 pour l'air à la température de la glace fondante, et dont les valeurs changent en raison inverse des densités, pour les autres gaz pris à la même température.

134. *Loi de l'écoulement des gaz d'après la théorie de M. Navier.* Tous les géomètres qui s'étaient occupés de l'écoulement des fluides élastiques avaient adopté les principes de Daniel Bernouilli; mais M. Navier vient d'établir une théorie nouvelle dans un mémoire très-remarquable imprimé dans les Mémoires de l'Académie des Sciences pour 1830. D'après M. Navier la vitesse d'écoulement est exprimée par la formule

$$V = \sqrt{2K(\text{Log } P - \text{Log } P')}$$

Les mêmes lettres désignent les mêmes choses que dans la formule précédente; mais le coefficient 2 K doit être multiplié par 2,30206 lorsqu'on veut se servir des tables de logarithmes ordinaires.

Cette formule ne s'applique qu'au cas où l'orifice d'écoulement est très-petit par rapport à la section du gazomètre.

135. Il est facile de voir que ces deux formules donnent à très-peu près les mêmes résultats lorsque la pression P ne surpasse que très-peu la pression P', et qu'elles donnent des résultats bien différens quand les pressions intérieures et extérieures présentent une grande différence.

136. Les vitesses données par les formules précédentes sont les *vitesses théoriques*, et pour vérifier la théorie il est nécessaire de les comparer aux *vitesses effectives*; celles-ci se déterminent par l'expérience, comme pour les liquides, en observant le volume de gaz qui sort dans un temps donné. Les expériences les plus précises qui aient été faites sur ce sujet sont dues à M. Lagerjhelm (Mém. de l'Acad. de Stockolm, 1822) et à M. D'Aubuisson (Ann. des Mines, 1826). Les vitesses effectives trouvées par ces habiles observateurs sont moindres que la vitesse théorique donnée par la formule de M. Navier : on en conclut que la *veine gazeuse* éprouve *une contraction* comme la *veine liquide*; et en cherchant quelle grandeur il faudrait donner à la *section contractée* pour que la théorie représentât tous les résultats de

l'expérience, on trouve que cette section devrait être égale à celle de l'orifice multipliée par 0,61 ou 0,62. Ainsi, il y a dans les gaz contraction de la veine fluide, et cette contraction est sensiblement la même que dans les liquides.

137. Quand les gaz s'écoulent du gazomètre par des ajutages coniques ou cylindriques dont la longueur est tout au plus 7 ou 8 fois le diamètre, on trouve que la dépense est plus grande que par les orifices en minces parois, comme pour les liquides; mais jusqu'à présent il n'y a pas un assez grand nombre d'expériences pour faire dans ce cas une comparaison exacte entre la dépense effective et la dépense théorique.

138. *De l'écoulement des gaz dans les tuyaux.*—M. Girard a tiré les conséquences suivantes, d'une série d'expériences qu'il a faites avec M. Cagniard-Latour sur l'écoulement de l'air et de l'hydrogène carboné :

« 1°. Que le gaz hydrogène carboné et l'air atmosphérique amenés au même état de compression, se meuvent suivant les mêmes lois et éprouvent exactement la même résistance dans les mêmes tuyaux, et cela indépendamment de leurs densités spécifiques.

» 2°. Que les résistances qu'éprouvent les fluides aériformes à se mouvoir dans les tuyaux de conduite sont exactement proportionnelles aux carrés de leurs vitesses moyennes.

» 3°. Enfin que, en conséquence de cette loi et de celle du mouvement linéaire, les dépenses du gaz par une conduite donnée de grosseur uniforme, sont toujours en raison directe de la pression indiquée dans le réservoir qui alimente l'écoulement, et en raison inverse de la racine carrée de la longueur de la conduite par laquelle il s'opère. »

Les expériences pour chaque gaz ont été faites dans deux conduites : la première avait $0^m,081$ de diamètre, et les longueurs ont été successivement 129^m, 376^m, et 623^m; la deuxième avait 0,016 de diamètre, et les longueurs ont été successivement 37^m, 56^m, 85^m, 109^m, 126. La pression,

dans toutes les expériences, a été de $0^m,034$ d'eau. Un orifice en mince paroi de même diamètre que la petite conduite donnait une dépense onze fois plus grande qu'une longueur de 126 mètres de cette conduite; ce rapport a été le même pour l'air et pour l'hydrogène carboné.

139. Les coudes, les renflemens, les inégalités quelconques dans les tuyaux de conduite produisent toujours dans les gaz comme dans les liquides, une diminution dans la vitesse d'écoulement.

140. *De l'écoulement des gaz par les tubes très-fins.* — Il résulte de quelques essais de M. Faraday, sur l'écoulement des gaz par des tubes très-fins, qu'il se produit alors des phénomènes singuliers dépendant de la pression et de la nature des gaz; les gaz les plus légers, qui, sous de fortes pressions, s'écoulent le plus vite, paraissent au contraire s'écouler le plus lentement sous de moindres pressions. Des recherches plus précises sur ce sujet seraient d'une grande importance.

141. *Des pressions latérales des gaz pendant l'écoulement.* — Il se produit, dans les grandes soufflerie des forges, un phénomène remarquable qui n'a pas échappé à la sagacité de MM. Boigues, propriétaires des forges de Fourchambaut, et dont MM. Thénard et Clément ont été témoins au mois de septembre de l'année dernière. Une ouverture de 1 à 2 pouces de diamètre étant faite dans la paroi *plane* d'un réservoir d'air comprimé, l'air s'échappe avec une grand violence; mais si on en approche un disque de bois ou de métal de 7 ou 8 pouces de diamètre, et qu'après avoir vaincu la première résistance on l'applique sur l'ouverture, il n'est plus repoussé comme auparavant; il oscille vivement, en s'éloignant ou en se rapprochant de l'ouverture dans des limites très-rapprochées; l'air continue ce s'échapper avec grand bruit, entre la surface du disque et celle de la paroi; et si alors on voulait retirer le disque, il faudrait un grand effort: quoique séparé de la paroi, il semble collé contre elle. M. Clément donne de ce phénomène une explication

qui semble tout-à-fait conforme aux principes du mouvement des fluides. La veine qui sort de l'ouverture doit s'épanouir en lame très-mince pour passer entre le disque et la paroi (*Fig.* 131); son épaisseur restant la même, elle doit s'élargir à mesure qu'elle approche de la circonférence du disque; ainsi elle se trouve dans le même cas que la veine fluide qui doit remplir un cône dont les sections deviennent toujours croissantes; de là une espèce de succion toute pareille aussi à celle que l'on observe dans les ajutages coniques. C'est donc la pression atmosphérique qui agit, de dehors en dedans; sur la surface du disque, avec une portion plus ou moins grande de son énergie, suivant que la pression latérale est plus ou moins réduite; et comme cette pression latérale est très-différente aux différentes distances de l'ouverture, il est nécessaire qu'aux points où elle est le plus faible, elle se trouve beaucoup moindre que la pression atmosphérique. Il paraît que la différence qui existe entre la pression atmosphérique et la somme des pressions latérales est elle-même dépendante de l'épaisseur de la lame d'air qui s'écoule, et qu'elle devient plus grande quand cette lame devient un peu plus épaisse; de là les oscillations du disque et l'effort qui est nécessaire pour le détacher. Les conditions de ce phénomène de succion peuvent être, pour les gaz, très-différentes de ce qu'elles sont pour les liquides, à cause de la différence totale des affinités moléculaires.

Ce fait n'a pas seulement un grande importance théorique, mais il éveille l'attention sur un véritable danger que peuvent offrir les soupapes de sûreté des machines à vapeur; on voit en effet que, sous certaines conditions, la lame mince de vapeur qui s'échappe, au lieu de repousser au loin la soupape pour s'ouvrir une large issue, pourrait se transformer en une force attractive d'autant plus capable de la retenir que le danger serait plus grand.

FIN DU LIVRE PREMIER.

LIVRE DEUXIÈME.

DE LA CHALEUR.

NOTIONS GÉNÉRALES.

142. L'AIR, l'eau et les divers corps de la nature peuvent exciter en nous des sensations particulières, que l'on appelle sensations de *chaleur* ou de *froid*. Ces affections se produisent au contact immédiat ou à de grandes distances, et elles sont d'une telle nature que nous ne pouvons en attribuer la cause à la substance propre des corps. En présence d'un foyer allumé, nous jugeons facilement que ce n'est pas la matière du charbon qui vient sous forme invisible nous toucher et nous réchauffer; et quand nous recevons les rayons solaires, nous jugeons de même que ce n'est pas la matière pondérable du soleil qui descend vers la terre, pour produire sur nos yeux l'impression de la lumière, et sur toutes les parties sensibles de notre organisation l'impression de la chaleur. Il y a donc un *agent* qui est distinct de la substance propre des corps, qui réside dans leur masse, qui se transmet à distance, qui établit une communication continuelle entre eux et nous, et qui est la *cause* des sensations de chaleur ou de froid que nous éprouvons. Cet agent a reçu différens noms: d'abord, confondant la cause avec l'effet, on l'a appelé *chaleur*; ensuite, par des notions plus justes sur son mode d'existence, on l'a nommé *fluide igné*, *matière du feu*, etc.;

enfin, à la réforme de la nomenclature chimique, Lavoisier, Berthollet, Morveau et Fourcroy l'ont appelé *calorique*. Cette dénomination a été adoptée par tous les physiciens ; et l'on a conservé le mot *chaleur* pour désigner la science qui traite des propriétés, des effets et des lois du calorique.

Cependant on ne s'en tient pas toujours à ces strictes définitions : il arrive souvent que le mot *chaleur* est employé pour désigner l'agent lui-même qui produit les phénomènes, et que le mot *calorique* est aussi employé pour désigner l'ensemble de nos connaissances sur ces phénomènes et sur leurs lois.

143. Le calorique n'agit pas seulement sur les corps organisés, mais il agit aussi sur les corps inogarniques. La glace peut fondre, l'eau peut entrer en ébullition, le fer peut rougir au feu; tous ces phénomènes, et tant d'autres de même espèce, ont nécessairement une cause, et nos sens nous avertissent que cette cause est le calorique. Il y a une telle correspondance, une telle simultaniété entre ces modifications qui surviennent dans les corps et les changemens qui surviennent dans nos sensations, que nous craignons peu de nous tromper en portant ce jugement. Ces seules indications peuvent nous servir à classer les phénomènes du calorique, et à établir d'avance l'ordre dans lequel nous devons en faire l'étude.

Nous diviserons la théorie de la chaleur en *cinq parties*. La *première* et la *deuxième partie* auront pour objet les *deux effets physiques* que le calorique produit dans les corps, savoir : 1° la *dilatation* ou les variations de volume ; et 2° le *changement d'état* ou le passage de l'état solide à l'état liquide, et de l'état liquide à l'état de vapeur.

La *troisième* et la *quatrième partie* auront pour objet les propriétés du calorique lui même. Dans la *troisième partie* nous traiterons de la *propagation du calorique*, qui comprend la *conducibilité* ou la propagation au contact, et le

calorique rayonnant ou la propagation à distance ; et dans la *quatrième partie*, nous traiterons du *calorique spécifique*, c'est-à-dire de la mesure des quantités de calorique qui sont nécessaires pour produire des effets déterminés sur des quantités de matière connues.

La *cinquième partie* aura pour objet la *production de la chaleur et du froid*, c'est-à-dire les actions mécaniques ou chimiques que la matière peut exercer sur la chaleur, pour la dégager ou pour l'absorber.

Nous essaierons d'abord de donner une idée générale des phénomènes qui servent de base à ces divisions de la théorie générale de la chaleur.

144. Dilatation. — Nous avons vu (13) que le calorique *dilate* tous les corps ; que le volume d'un corps quelconque dépend du degré de chaleur qu'il éprouve, et que, toutes choses égales d'ailleurs, le même degré de chaleur lui donne toujours exactement le même volume. Ainsi les degrés de dilatation peuvent nous servir à mesurer les degrés de chaleur. On appelle *température* d'un corps l'état de volume auquel il se trouve par l'influence du calorique ; et l'on appelle *thermomètres*, les instrumens qui servent à mesurer les températures.

La *Figure* 159 représente un *thermomètre à mercure* ; la *boule* B est pleine de mercure, et ce liquide s'élève dans la *tige* T, jusqu'à une certaine hauteur H, qui dépend de la température. Lorsqu'on chauffe la boule, le mercure *augmente* de volume, le thermomètre *monte*, et l'on dit que la *température s'élève* ; lorsqu'on la refroidit, le mercure *diminue* de volume, le thermomètre *descend* et la *température s'abaisse*. Toutes les fois que le thermomètre revient au même point ou au même état de volume, la température est la même. Si l'on prenait au autre thermomètre à mercure (*Fig.* 160), plus grand ou plus petit que le premier, ces deux instrumens monteraient et descendraient ensemble ; mais les ascensions et les dépressions pourraient être

très-différentes : les *réservoirs* B et C étant égaux, il suffirait, par exemple, que le tube du premier eût un diamètre dix fois moindre que le tube du second, pour que ses mouvemens eussent cent fois plus d'étendue ; quand il monterait de 100 millimètres, le second ne monterait que de 1 seul millimètre. L'un serait cent fois plus *sensible* que l'autre.

Ces thermomètres ne pourraient servir qu'à indiquer des températures *égales*, des températures *plus hautes* et des températures *plus basses*, suivant que le sommet de la colonne reviendrait à un même point fixe, ou qu'il varierait au dessus ou au dessous de ce point. De cette manière, ils pourraient déjà être de quelque avantage pour la science ; mais ce qu'il y a d'essentiel dans les thermomètres, c'est leur *graduation* ; car ce n'est qu'en les graduant, que l'on peut parvenir à exprimer les températures par des nombres, à les comparer entre elles, et à en déduire les lois du calorique.

Les principes de la *graduation* des thermomètres reposent sur ce fait : qu'il y a des phénomènes qui se produisent toujours à la même température. Ainsi, en prenant dans la paume des mains un des thermomètres précédens, on le verra monter plus ou moins, suivant que l'on aura les mains plus chaudes ou plus froides. Mais si l'on a la patience d'attendre, et de tenir les mains pressées jusqu'à ce qu'elles se soient réchauffées le plus possible, on verra le thermomètre qu'elles tiennent enfermé monter lentement jusqu'à une certaine limite, où il arrivera toujours, et qu'il ne dépassera jamais. Dans toutes les saisons, sous tous les climats et chez tous les individus il s'arrêtera au même point ou à très-peu près. Ainsi la température du corps humain est une température constante, et elle offre un *point fixe*, que l'on pourrait prendre pour point de départ dans l'évaluation numérique des températures. Cependant il y a d'autres phénomènes qui sont plus mathématiquement constans, et aux-

quels il est plus simple de recourir. Dans la *glace fondante*, un thermomètre revient toujours exactement au même point, soit que cette glace ait été formée artificiellement, soit qu'elle ait été formée naturellement au dessus des montagnes, sur les rivières ou sur les mers : pourvu qu'elle soit composée d'eau bien pure, son *point de fusion* est un point parfaitement fixe. Il en est de même pour les différens points auxquels les corps *fusibles*, comme la cire, le plomb, etc., passent de l'état solide à l'état liquide; chacun d'eux entre en fusion à une température qui est toujours la même. Ce fait fondamental paraît avoir été observé pour la première fois par Amontons (*Ac. des Sciences*, 1703).

L'ébullition de l'eau présente un phénomène analogue : une fois que la chaleur est arrivée au point où l'eau bout avec force, en poussant le feu plus vivement on arrive à la faire bouillir plus vite, mais non pas à la chauffer davantage; le thermomètre reste au même point parfaitement immobile. Sous la *même pression* barométrique, dans tous les lieux de la terre, l'eau pure en ébullition donnera le même point fixe. Il en est de même de tous les corps au moment où ils passent de *l'état liquide à l'état de vapeur* par l'ébullition; chacun d'eux a son point particulier, qui est fixe sous la même pression.

Concevons maintenant que l'on prenne *deux points fixes*, celui de la *glace fondante*, par exemple, et celui de l'*eau bouillante*, et que, les ayant marqués l'un et l'autre sur le tube ou sur la tige du thermomètre, on divise l'intervalle en 100 parties égales, et que l'on continue les division ou *degrés* au dessus et au dessous des points extrêmes, on aura un *thermomètre gradué*, qui s'appelle *thermomètre centésimal*, et qui s'appellerait *thermomètre de Réaumur*, si l'on avait divisé l'intervalle en 80 parties seulement. Le point de la glace fondante est le *zéro* de la division, et les degrés qui sont *au dessous* se distinguent par le signe *moins*; $-10°$ ou $-20°$ signifient *moins dix* ou *moins vingt degrés*.

145. Changement d'état. — 1 kilogramme de glace à la température de *zéro*, et un kilogramme d'eau à la température de 75°, donnent, après leur mélange et après la fusion complète de la glace, deux kilogrammes d'eau à la température 0. Ainsi la glace a été fondue, mais elle n'a pas changé de température; l'eau chaude à 75° est restée liquide, mais elle s'est refroidie jusqu'à la température de la glace. Donc le kilogramme de glace, *pour se fondre*, a *absorbé* tout le calorique qu'a perdu le kilogramme d'eau, en descendant depuis 75° jusqu'à 0; il l'a absorbé pour se fondre, puisque sa température n'a pas changé. La calorique absorbé et comme dissimulé dans la masse liquide qui résulte de la fusion s'appelle *calorique latent* ou *calorique de fusion*. L'eau en se congelant reproduit et dégage de nouveau, pendant sa *solidification*, tout le calorique qu'elle avait absorbé pendant sa fusion; c'est-à-dire qu'un kilogramme de glace à 0 et un kilogramme d'eau à 0 n'ont pas la même quantité de chaleur, quoique étant à la même température; l'eau en a plus que la glace, et ce qu'elle en dégage pendant qu'elle se congèle, serait capable d'élever un autre kilogramme d'eau de 0 à 75°.

Le même phénomène se produit dans le passage de l'état liquide à l'état de vapeur. Au moment de sa formation la vapeur se trouve à la même température que le liquide qui lui donne naissance, mais à poids égal elle a beaucoup plus de calorique; car elle en absorbe, à mesure qu'elle se forme, bien plus encore que la glace n'en absorbe à mesure qu'elle se fond. Ce calorique absorbé et dissimulé dans la masse gazeuse de la vapeur s'appelle encore *calorique latent*, et quelquefois *calorique de vaporisation* ou *calorique d'élasticité*. Quand la vapeur revient à l'état liquide, elle reproduit et dégage de nouveau, pendant sa *condensation*, toute cette quantité de calorique qu'elle avait dû prendre pendant sa formation.

Ces absorptions de calorique en proportions différentes,

pendant la fusion et la vaporsiation, et ces reproductions égales, pendant la solidification et la condensation, se manifestent nécessairement dans tous les corps. *Le phénomène de la chaleur latente est la condition essentielle des changemens d'état.*

146. Propagation du calorique. — Le calorique se propage dans les corps et il se propage à distance.

Dans les corps il se répand de proche en proche, jusqu'aux molécules les plus intérieures de leur substance. Au feu de forge, par exemple, les pièces de fer sont d'abord échauffées à leur surface, puis le calorique gagne peu à peu, et pénètre enfin toute l'étendue de la masse qui est enveloppée de feu. Cette propagation intérieure du calorique est ce que l'on appelle la *conducibilité* ou la *conductibilité;* elle est plus ou moins rapide, suivant la nature des corps. On nomme *bons conducteurs* ceux qui se laissent pénétrer facilement par la chaleur, et qui prennent rapidement la température qu'ils doivent avoir; et *mauvais conducteurs* ceux qui se laissent pénétrer moins facilement, et qui sont plus lents à se mettre en équilibre de température dans toutes leurs parties. Les métaux sont en général de bons conducteurs.

Le verre, le soufre, le charbon, les pierres de différentes espèces, toutes les substances végétales et animales, sont en général de mauvais conducteurs; les liquides et les gaz sont les plus mauvais conducteurs que l'on connaisse.

A distance, le calorique se propage à peu près comme la lumière : il traverse le vide avec une grande vitesse, comme la lumière traverse les espaces célestes; il passe dans certains corps, sans s'y arrêter et sans les rendre chauds, à peu près comme la lumière passe dans le verre, sans s'y éteindre et sans le rendre lumineux. Ce mode de propagation est ce que l'on appelle le *rayonnement du calorique;* c'est par rayonnement que le calorique du soleil arrive à la terre; c'est aussi par rayonnement qu'un foyer nous échauffe à travers les couches d'air qui nous séparent de lui, et

qu'un corps très-peu chaud nous fait sentir sa présence, même à une assez grande distance. Le *calorique rayonnant* devient du calorique ordinaire, lorsqu'il est absorbé par les corps et qu'il se répand par la conducibilité dans les différentes parties de leur masse; et réciproquement, le calorique qui s'échappe des corps, à mesure qu'ils se refroidissent, s'échappe sous la forme de calorique rayonnant, à moins qu'il ne rencontre immédiatement des corps qui l'absorbent et dans lesquels il ne puisse passer que de molécule à molécule.

147. Calorique spécifique.—Les diverses températures des corps expriment les variations de leurs volumes, mais elles n'expriment pas les *quantités de calorique* qu'ils reçoivent ou qu'ils perdent pour éprouver ces variations. Par exemple, quand le thermomètre à mercure s'élève de 1°, le mercure prend la centième partie de l'accroissement de volume qu'il est susceptible de prendre, depuis la température de la glace fondante jusqu'à celle de l'ébullition de l'eau; mais nous ne pouvons pas savoir d'avance s'il prend en même temps la centième partie de calorique qui lui est est nécessaire pour passer de l'une à l'autre de ces températures. A plus forte raison, des corps différens, ayant le même poids et la même température, peuvent exiger des quantités de chaleur très-différentes, pour s'élever l'un et l'autre à une température plus haute de 1°; et, en effet, 1 kilogramme de mercure, par exemple, exige beaucoup moins de chaleur que 1 kilogramme d'eau, pour passer de 0 à 1°, ou 1° à 2°, ou de 99° à 100°. A poids égal et à température égale, un corps est dit avoir plus de *capacité pour la chaleur* qu'un autre corps, lorsqu'il exige une plus grande quantité de chaleur pour éprouver les mêmes variations de température; s'il en exige le double, sa capacité est double; s'il en exige le triple, sa capacité est triple, etc.; ainsi la capacité de l'eau est à peu près 30 fois plus grande que celle du mercure, puisque, à poids égal et à température égale, l'eau reçoit 30 fois plus de chaleur

que le mercure quand elle s'élève de 1°, et qu'elle en perd 30 fois plus quand elle s'abaisse de 1°.

148. PRODUCTION DE LA CHALEUR ET DU FROID. — Le calorique peut être accumulé dans les corps, mais il ne peut pas y être retenu et enfermé, comme l'air, l'eau et les autres fluides pondérables sont enfermés dans les vases; aucune substance n'est impénétrable au calorique : c'est un fluide *incoercible* qui est sans cesse en mouvement pour se communiquer de proche en proche dans les corps contigus, ou pour se répandre dans l'espace sous forme rayonnante. Si un corps chaud, tel qu'un boulet, par exemple, était enfoncé à 10 pieds sous terre, tout le monde sait que sa chaleur se communiquerait aux couches environnantes, puis de celles-ci aux suivantes, et ainsi de proche en proche jusqu'à de très-grandes distances; après un temps assez long, ce boulet serait refroidi, mais aucune portion de sa chaleur ne serait perdue; elle serait répandue dans les corps voisins, et l'on pourrait à la rigueur la retrouver et la recueillir en totalité. Lorsqu'un corps se refroidit dans l'air, le phénomène est différent : une portion de sa chaleur passe aux molécules d'air qui le touchent, mais une portion s'échappe sous forme rayonnante, à peu près comme la lumière s'échappe de la flamme; et ces rayons de calorique se répandant de toutes parts, les uns vont tomber sur des corps qui les arrêtent et les absorbent en partie, les autres s'élèvent vers le zénith, traversent toute l'épaisseur de l'atmosphère et vont se *perdre* dans le vide du ciel. Il y en a sans doute qui vont tomber sur le soleil et sur les corps célestes, comme il arrive aussi à la lumière d'une bougie de se répandre jusqu'aux astres. Ce qui est vrai d'un corps suspendu dans l'air est vrai pareillement du globe entier de la terre, suspendu au milieu de l'espace. Ainsi la terre se refroidit : à chaque instant l'atmosphère et tous les corps terrestres qui sont exposés à l'aspect du ciel perdent de leur calorique par le rayonnement. Il faut donc qu'il y ait des sources

de chaleur qui réparent à chaque instant les pertes que fait la terre, et qui puissent maintenir sur sa surface cette température moyenne dont l'intensité est une condition nécessaire des phénomènes de la végétation et des fonctions de la vie.

Nous verrons qu'il y a trois sources de chaleur pour compenser le refroidissement que la terre éprouve, et pour maintenir d'une manière à peu près permanente l'équilibre des températures terrestres. La première est une chaleur primitive qui règne encore à de grandes profondeurs, et qui se dissipe peu à peu; elle entretient les parties centrales de la terre à une chaleur sans doute plus grande que celle du fer fondu, mais elle ne contribue que dans une faible proportion aux températures de la surface.

La seconde est la chaleur solaire, dont nous donnerons la mesure dans les Élémens de Météorologie : nous verrons que tout le calorique que le soleil répand sur la terre dans le cours d'une année est capable de fondre une certaine quantité de glace que nous sommes parvenus à déterminer par des moyens simples et rigoureux.

La troisième source de chaleur est celle qui résulte des actions mécaniques et chimiques qui s'exercent sur la matière. Le simple contact des corps dégage de la chaleur; la compression, le frottement, la percussion, et tous les changemens mécaniques que peuvent éprouver les molécules matérielles dégagent pareillement de la chaleur ou du froid. Enfin les combinaisons chimiques, soit les combinaisons naturelles qui accompagnent la naissance, le développement et la décomposition des êtres, soit les combinaisons accidentelles, qui sont des produits de l'art, sont autant de phénomènes de production de chaleur ou de froid, dont il importe de connaître les lois.

PREMIÈRE PARTIE.

Dilatation.

CHAPITRE PREMIER.

Construction du Thermomètre à mercure.

149. La construction du thermomètre à mercure se réduit à un petit nombre d'opérations qui sont faciles à exécuter. Il faut préparer le tube, introduire le liquide, fermer le thermomètre et le graduer.

150. Les tubes de thermomètre doivent avoir un diamètre intérieur qui soit partout le même, afin que des longueurs égales correspondent à des volumes égaux. Pour s'assurer de cette condition, on fait passer, dans l'intérieur du tube que l'on veut employer, une petite colonne de mercure de 1 ou 2 centimètres de longueur; ensuite, par une inclinaison convenable, ou par une légère pression que l'on peut exercer avec une vessie de gomme élastique, on fait courir cette colonne d'un côté ou de l'autre, jusqu'à ce qu'elle ait parcouru toute l'étendue du tube (*Fig.* 168). Si, dans chaque position, elle occupe la même longueur, on est très-sûr que le tube est partout d'un diamètre égal; et, pour l'employer à la construction d'un thermomètre, il ne reste plus qu'à y souffler une boule (*Fig.* 159), ou à y souder un réservoir cylindrique (*Fig.* 160).

Lorsqu'on veut employer un tube inégal, il faut le *cali-*

brer, c'est-à-dire marquer sur toute sa longueur des intervalles successifs qui correspondent à des volumes égaux. Cette opération est délicate; mais, au moyen de la disposition qui est représentée *Figure* 168, on parvient à la faire avec une grande exactitude.

151. Pour introduire le liquide, on chauffe la boule afin d'en dilater l'air, et ensuite on plonge rapidement l'extrémité du tube dans un bain de mercure. Le refroidissement qui a lieu diminue l'élasticité de l'air intérieur, et la pression atmosphérique force le liquide à monter de plus en plus; il suffit qu'il en arrive seulement quelques gouttes dans le réservoir (*Fig.* 161). Alors, retournant l'appareil pour chauffer de nouveau la boule, on la chauffe jusqu'à faire bouillir le liquide qu'elle contient; les vapeurs de mercure remplissent bientôt toute la capacité de la boule et du tube; l'air est complètement chassé, et cette fois, en plongeant très-vite l'extrémité du tube dans le bain de mercure (*Fig.* 162), on est presque assuré qu'il ne restera pas la moindre trace d'air ni de vapeur d'eau dans tout l'intérieur de l'appareil. Cependant, si l'on apercevait encore, soit dans le réservoir, soit dans la longueur du tube, la plus légère bulle d'air, il faudrait recommencer l'ébullition et le retournement.

152. Avant de fermer le thermomètre, on en *règle la course*, c'est-à-dire que l'on fait sortir ou rentrer du liquide jusqu'à ce que le sommet de la colonne corresponde à peu près à la hauteur que l'on veut choisir pour la température moyenne; ensuite on ferme à la lampe l'extrémité du tube. Cette opération se fait de deux manières : 1°. en faisant le vide au dessus de la colonne thermométrique; 2°. en y laissant de l'air. Dans le premier cas, on commence par effiler l'extrémité du tube, et, après cela, on chauffe la boule sur des charbons jusqu'au point de faire sortir une petite goutte de liquide. A cet instant même, on dirige le dard du chalumeau (*Fig.* 163) sur l'extrémité du bec effilé du tube;

le verre se fond et le tube est fermé; il ne reste plus qu'à l'arrondir en le présentant au dard de la lampe après que la colonne s'est retirée par le refroidissement.

Dans le second cas, le thermomètre étant à la température *ambiante*, c'est-à-dire à la température de l'air environnant, on présente l'extrémité du tube au dard de la lampe, et on la ferme hermétiquement; ensuite on la maintient rouge et à peu près en état de liquéfaction pendant quelques instans, et alors, chauffant rapidement la boule, soit avec la main, soit avec une lampe, la colonne monte, l'air est repoussé, et par la pression qu'il exerce au sommet du tube sur le verre fondu, il forme une espèce de réservoir qui est plus ou moins grand, suivant que l'air y est refoulé avec plus ou moins de force (*Fig.* 166 et 167). Ce réservoir supérieur est toujours nécessaire lorsqu'on laisse de l'air quand le tube thermométrique est très-fin : sans pression supérieure, la colonne se divise à chaque instant.

153. La *graduation* du thermomètre consiste à marquer les *deux points fixes*, et à diviser en parties égales l'intervalle qui les sépare. Les points fixes qui sont généralement adoptés sont celui de la glace fondante et celui de l'eau bouillante. Pour marquer le point de la glace fondante, on plonge dans un vase rempli de glace pilée (*Fig.* 164) la boule du thermomètre et toute la partie de la tige dans laquelle il se trouve du liquide. La température ambiante étant plus haute que 0, la glace fond peu à peu, et toute la masse se maintient à la température fixe de la glace fondante. Après quelques instans, le thermomètre a pris cette température; il reste parfaitement stationnaire, et l'on marque le point précis où il se trouve; on le marque sur le tube d'abord à l'encre, et ensuite on y fait un trait au diamant : c'est le 0 ou le point de départ de notre *échelle thermométrique*.

Pour marquer le point de l'ébullition, on prend un vase à long col (*Fig.* 165), dans lequel on fait bouillir de *l'eau*

distillée; après quelques instans d'ébullition, la vapeur en a échauffé également toutes les parties, et elle s'échappe par les ouvertures latérales; alors le thermomètre est enveloppé de toutes parts d'un bain de vapeur, dont la température est partout la même et partout égale à la température de la première couche d'eau bouillante. Bientôt la colonne arrive à un point fixe, qu'elle ne peut plus dépasser; c'est le point d'ébullition; on le marque d'abord à l'encre et ensuite au diamant. Si, au moment de l'expérience, la hauteur du baromètre était sensiblement différente de 760 ^{mm}, il faudrait faire une correction, dont nous donnerons la valeur en parlant de l'ébullition.

L'intervalle des deux points de la glace fondante et de l'eau bouillante est divisé en 100 degrés ou en 100 parties égales; les divisions sont continuées au dessus et au dessous de ces points, et leur ensemble forme l'*échelle thermométrique*. Quand les divisions sont marquées au diamant sur le tube lui-même, on dit que le tube porte son échelle; mais le plus souvent les divisions sont marqués sur une monture en bois, en ivoire, en verre ou en métal; il faut alors fixer le thermomètre sur sa monture, de manière que les points de la glace et de l'eau bouillante qui sont marqués sur la tige correspondent très-exactement et d'une manière permanente aux points 0 et 100 qui sont marqués sur l'échelle divisée de la monture.

154. Tous les thermomètres à mercure, construits d'après ces principes, sont des instrumens *comparables*, c'est-à dire qu'ils marchent ensemble, et indiquent en même temps le même nombre de degrés. En effet, deux volumes d'un même corps étant pris à 0, si on les porte à une autre température, de telle sorte que l'un d'eux se dilate, par exemple, de la millième partie de son volume à 0, l'autre se dilatera aussi de la millième partie de son volume à 0; par conséquent deux thermomètres à mercure doivent marquer en même temps 1°, 2°, 3°, etc., parce qu'ils doi-

vent prendre en même temps le centième, les 2 centièmes, les 3 centièmes, etc., de l'accroissement de volume qu'ils sont susceptibles de prendre en passant de 0 à 100°.

Cependant ce raisonnement n'est vrai qu'en supposant le mercure contenu dans des vases ou dans des enveloppes solides de même nature; car, dans les thermomètres, ce n'est pas la *dilatation absolue* du mercure que l'on observe, mais sa *dilatation apparente*, c'est à-dire la différence qui existe entre l'accroissement de volume du mercure et l'accroissement de capacité de l'enveloppe qui le contient. Si le verre se dilatait autant que le mercure, le thermomètre resterait stationnaire à toutes les températures; et même si l'enveloppe du verre se dilatait plus que le liquide qu'elle contient, les augmentations de chaleur feraient baisser le thermomètre, au lieu de le faire monter. Pour que les thermomètres soient rigoureusement comparables, il faut donc que leurs enveloppes soient également dilatables.

155. On peut construire des thermomètres à mercure qui marquent jusqu'à 3 ou 4 cents degrés, mais il est impossible de les faire aller plus loin, soit parce que à ces hautes températures le verre offre moins de résistance, soit aussi parce que le mercure donne alors des vapeurs abondantes qui vont se condenser dans les parties froides, ou qui pressent le tube au point de le briser. Au dessous de 0, le thermomètre à mercure ne donne des indications justes que jusqu'à — 30 ou — 35°; car il approche alors de son point de congélation, qui est vers — 40, et au changement d'état, tous les corps éprouvent des modifications très-brusques.

156. Pour les recherches, et même pour les observations auxquelles on veut donner quelque exactitude, il convient d'employer des thermomètres qui n'aient que 15 ou 20 degrés de course : l'un marquant, par exemple, les températures depuis + 10 à — 5, un autre de — 5 à — 20,

un autre de + 10 à + 25, etc.; alors les réservoirs ne contiennent que très-peu de mercure, les tubes sont d'un diamètre intérieur excessivement fin, et chaque degré occupe une grande longueur. Ces thermomètres ont le double avantage de prendre rapidement la température, et de l'indiquer avec une grande précision. Pour les graduer, il est nécessaire d'avoir un *thermomètre étalon*, c'est-à-dire un thermomètre gradué à la glace fondante et à l'eau bouillante, et de l'exactitude duquel on soit parfaitement assuré.

M. Bellani a observé que le o des thermomètres à mercure s'élève avec le temps, comme si la boule devenait plus petite. Déjà, en 1817, MM. Gay-Lussac et Arago avaient remarqué que le o du thermomètre des caves de l'Observatoire s'était élevé de 0,38. M. Pictet, M. Flaugergues et plusieurs autres physiciens ont reconnu la vérité de cette observation importante. Quelquefois la variation s'élève jusqu'à plus de deux degrés. On ne sait pas encore d'une manière certaine si ce phénomène dépend d'une portion d'air qui se dissoudrait dans le mercure pour en augmenter le volume, ou s'il dépend de la pression atmosphérique, qui pourrait, à la longue, en comprimant le verre de la boule, lui donner une moindre capacité. S'il reste quelque doute sur la vraie cause du fait, il n'en reste aucun sur le fait lui-même, et il importe que tous les observateurs s'astreignent à vérifier souvent les graduations de leurs thermomètres.

CHAPITRE II.

Formules de dilatation.

157. Nous donnerons séparément les formules de la *dilatation linéaire* et celles de la *dilatation cubique*.

La *dilatation linéaire* d'un corps est la dilatation qu'il éprouve dans sa longueur, ou, plus généralement, la dilatation qu'il éprouve dans une seule de ses dimensions.

La *dilatatiou cubique* est la dilatation en volume. Concevons, par exemple, un cube dont toutes les arêtes aient une longueur de 1 mètre à la température 0, et supposons qu'on le porte de 0 à une autre température quelconque : par la dilatation, chacune des arêtes va s'allonger, et le volume total va aussi augmenter; l'allongement des arêtes sera la dilatation linéaire, et l'augmentation de volume sera la dilatation cubique. Chacune des arêtes devenant, par exemple, $1 + l$, le volume deviendra $(1 + l)^3$ ou $1 + 3l + 3l^2 + l^3$, ou simplement $1 + 3l$; parce que la dilatation linéaire est toujours une si petite fraction de la longueur primitive, qu'il est permis d'en négliger le triple carré $3l^2$, et à plus forte raison le cube l^3. Ainsi la *dilatation cubique* est *triple* de la *dilatation linéaire*.

On dit que la dilatation est uniforme, par rapport au thermomètre à mercure, lorsqu'elle est la même pour chaque degré de ce thermomètre, de telle sorte que l représentant la dilatation linéaire pour 1°, dans le cas de la dilatation uniforme, $2l$ sera la dilatation pour 2°, et tl la dilatation pour t°; de même, k étant la dilatation cubique pour 1°, $2k$ sera la dilatation pour 2°, et en général tk la dilatation pour t°.

158. Désignons par l la dilatation linéaire d'un corps,
par L^o sa longueur à la température o,
par L^t sa longueur à la température t°,
en admettant que la dilatation soit uniforme, nous aurons une relation entre ces quatre quantités, l, t, L°, L', au moyen de laquelle, trois de ces quantités étant données, il sera facile de trouver la quatrième.

Puisqu'un corps, dont la longueur est 1 à la température o, prend une longueur $1 + tl$ à la température t, il est évident que les longueurs L^o et L^t seront entre elles comme les longueurs correspondantes de l'unité, c'est-à-dire que l'on a la proportion fondamentale

$$L^o : L^t :: 1 : 1 + tl;$$

D'où il résulte,

1°. $$L^t = L^o (1 + tl),$$

ce qui peut être traduit ainsi : pour avoir la longueur L^t d'un corps à la température t, il faut *multiplier* sa longueur à o par l'unité augmentée de t fois la dilatation linéaire de sa substance pour 1°;

2°. $$L^o = \frac{L^t}{1 + tl};$$

pour avoir la longueur L^o d'un corps à la température o, il faut *diviser* la longueur qu'il a à la température t par l'unité augmentée de t fois la dilatation linéaire de sa substance pour 1°;

3°. $$1 + tl = \frac{L^t}{L^o} \text{ ou } tl = \frac{L^t - L^o}{L^o}$$

en tirant la valeur de t, on aura

$$t = \frac{L^t - L^o}{lL^o}$$

ce qui donne la température, au moyen de la longueur à o, de la longueur dilatée et de la dilatation linéaire.

4°. En tirant la valeur de l, on aura

$$l = \frac{L^t - L^o}{t L^o},$$

ce qui donne la dilatation linéaire, au moyen de la longueur à o, de la longueur dilatée et de la température.

5°. L^t et $L^{t'}$ étant deux longueurs dilatées d'un même corps aux températures t et t', $1 + tl$ et $1 + t'l$ étant les deux longueurs de l'unité correspondantes aux mêmes températures, on aurait pareillement

$$L^t : L^{t'} :: 1 + tl : 1 + t'l,$$

d'où

$$L^{t'} = L^t \frac{1 + t'l}{1 + tl},$$

c'est la formule rigoureuse pour avoir une longueur à la température t', au moyen d'une autre longueur à la température t, sans passer par la longueur à o.

Quelquefois on peut employer la formule plus simple

$$L^{t'} = L^t [1 + l(t' - t)],$$

qui n'est qu'une formule d'approximation.

159. Nous aurons des formules tout-à-fait semblables pour la dilatation cubique, 1 étant le volume d'un corps à o, et k la dilatation cubique de sa substance pour 1°, à 1° le volume sera $1 + k$, à 2° il sera $1 + 2k$, et en général à t° il sera $1 + tk$.

D'après cela, v_o étant un autre volume quelconque de la même substance pris à o, et v_t le volume dilaté pour la température t, ces deux volumes seront entre eux comme les volumes correspondans de l'unité : ce qui donne la proportion fondamentale

$$v_o : v_t :: 1 : 1 + tk;$$

d'où l'on tire, comme pour la dilatation linéaire,

1°. $$v^t = v_o (1 + tk),$$

ce qui donne le volume dilaté, au moyen du volume à o;

2°. $$v_o = \frac{v^t}{1 + tk},$$

ce qui donne le volume à o, au moyen du volume dilaté;

3°. $$t = \frac{v_t - v_o}{k v_o},$$

ce qui donne la température, au moyen du volume à o, du volume dilaté et de la dilatation cubique;

4°. $$k = \frac{v_t - v_o}{t v_o}$$

ce qui donne la dilatation cubique, au moyen du volume à o, du volume dilaté et de la température;

5°. On a pareillement, entre deux volumes dilatés, v_t et v_t', et les deux volumes correspondans de l'unité pour les températures t et t', cette proportion

$$v_t' : v_t :: 1 + t'k : 1 + tk,$$

d'où l'on tire $$v_t' = v_t \frac{1 + t'k}{1 + tk},$$

ou par approximation $v_t' = v_t (1 + k (t' - t))$.

160. Toutes ces formules sont nécessaires pour les calculs de réduction de température; il suffira de s'exercer sur quelques exemples particuliers, pour n'avoir plus aucune difficulté à les employer.

CHAPITRE III.

De la dilatation des gaz.

161. C'est à M. Gay-Lussac que nous devons la détermination exacte de la dilatation des gaz. Son appareil est représenté *figure* 170; il se compose d'une caisse en fer-blanc BB', qui repose sur un fourneau F'; deux ouvertures latérales et opposées V et V' sont destinées à recevoir, l'une un thermomètre à mercure *bst*, l'autre le tube à air $b'it'$; ces deux instrumens sont dans la même couche horizontale, à quelque distance au dessous du niveau nn' du liquide contenu dans la caisse. Le couvercle cc' est percé de trois ouvertures; deux donnent issue à la vapeur, et celle du milieu reçoit un thermomètre vertical, dont la boule b'' descend au même niveau que les boules b et b'. Tout l'appareil peut être mis à la température 0, et ensuite élevé graduellement de degré en degré jusqu'à la température de l'ébullition de l'eau; ensuite, pour faire une contre-épreuve, on peut le laisser refroidir lentement, et redescendre du point d'ébullition, en passant par les mêmes degrés. Chaque température doit être maintenue fixe pendant assez long-temps pour que l'on puisse observer les thermomètres et le tube à air $b'it'$.

162. Voici maintenant les données d'où l'on peut conclure la dilatation. Le tube à air $b'it'$ (*Fig.* 172) est un *tube gradué*, c'est-à-dire qu'il est divisé en parties de capacités égales, et que l'on connaît le nombre de ces parties qui sont contenues dans la boule, à une température

donnée. De d en d' il y aura, par exemple, 100 parties, et l'on saura qu'à la température 0, la boule et le tube jusqu'en d contiennent 1000 de ces parties. Par la dilatation, chacune de ces parties va s'agrandir; mais, la dilatation étant uniforme, chacune s'agrandira de la même quantité; elles resteront égales, et le volume dilaté de la boule, jusqu'en d, contiendra encore dix fois le volume dilaté du tube, de d en d'. Il suffit d'introduire dans ce tube de l'air parfaitement sec, et d'en déterminer à chaque instant le volume, la pression et la température. Pour y introduire l'air sec, on le remplit d'abord de mercure, et on l'adapte à un tube plus large (*Fig.* 171), contenant des fragmens de muriate de chaux; un fil de fer f, que l'on peut enfoncer ou retirer, traverse le grand tube, pénètre dans le petit, et peut même arriver jusqu'à la boule. En inclinant un peu l'appareil, le mouvement du fil fait tomber successivement des gouttes de mercure, et l'air sec du grand tube passe pour en prendre la place. On arrête l'opération, lorsqu'il ne reste plus qu'une petite colonne de mercure i, qui doit servir d'*index*. C'est alors que l'on dispose le tube dans la caisse de fer-blanc, comme il est représenté (*Fig.* 170.)

Le volume de l'air intérieur est donné par la position de l'index.

Sa pression est donnée par la hauteur du baromètre, que l'on observe avec soin pendant toute la durée de l'expérience.

Enfin sa température est donnée par les deux thermomètres bt et $b''t''$; car on prend toutes les précautions nécessaires pour que la couche horizontale vv' soit à la même température dans toute son étendue, et l'on a grand soin de retirer ou d'enfoncer les tiges des thermomètres et celle du tube à air, pour que l'on puisse apercevoir seulement dans chaque observation l'extrémité des colonnes thermométriques et celle de l'index.

Lorsque la température s'élève, le volume de l'air aug-

mente; il occupe dans le tube un plus grand nombre de divisions, et chacune de ces divisions est elle-même plus grande, à cause de la dilatation du verre. On peut donc, en faisant les corrections convenables, déterminer pour chaque degré de température le volume correspondant de l'air, et conclure sa dilatation.

M. Gay-Lussac a démontré de cette manière :

1° Que la dilatation de l'air est uniforme depuis o jusqu'à 100°;

2° Qu'elle est pour chaque degré la 267e partie, ou les 0,00375 du volume à o;

3° Que tous les gaz se dilatent uniformément comme l'air, et que, pour tous, le *coefficient de dilatation* reste le même; il est toujours pour chacun d'eux les 0,00375 du volume à o.

Tandis que M. Gay-Lussac, en France, découvrait ces lois remarquables, M. Dalton, à Manchester, parvenait au même but.

163. MM. Dulong et Petit ont étudié la dilatation des gaz pour des températures plus basses que o et plus hautes que 100°. Ce travail a été le point de départ de ces habiles physiciens, dans les recherches qu'ils ont faites sur la chaleur, et qui constituent les plus belles découvertes expérimentales dont la théorie de la chaleur se soit enrichie dans ces derniers temps.

Depuis o jusqu'à — 36°, la dilatation de l'air rapportée au thermomètre à mercure est encore uniforme et la même qu'entre o et 100°. Au-dessous de — 36°, le mercure est trop près de son point de congélation pour qu'on puisse l'employer à la mesure des températures.

Depuis 100° jusqu'à 360°, la dilatation de l'air devient décroissante, quand on la rapporte au thermomètre à mercure; c'est-à-dire que pour chaque degré, et par conséquent pour chaque accroissement égal de volume que prend le thermomètre, l'air prend des accroissemens de volume

qui deviennent de plus en plus petits. Réciproquement, au dessus de 100°, les dilatations du mercure sont croissantes, par rapport aux dilatations de l'air. D'après cela il semble qu'on doive être fort embarrassé de décider entre le mercure et l'air, pour savoir auquel des deux appartient l'irrégularité. Mais si l'on considère que tous les gaz se comportent exactement comme l'air, et que d'ailleurs l'état gazeux a en lui-même quelque chose de plus permanent que l'état liquide, qui n'est qu'un état passager, on comprendra facilement que c'est la dilatation de l'air qu'il faut prendre pour type, et que c'est à elle qu'il faut rapporter les dilatations de tous les corps. Nous reviendrons sur ce sujet dans le chapitre 7, en traitant de la comparaison que l'on peut faire des diverses échelles thermométriques. Mais, dès ce moment, nous allons rapporter le tableau des comparaisons qui ont été faites par MM. Dulong et Petit, de la marche relative des thermomètres à air et à mercure, depuis la température de 100° jusqu'à la température de 360°, qui est celle de l'ébullition du mercure.

TEMPÉRATURES indiquées par le therm. à mercure, à enveloppe de verre.	TEMPÉRATURES indiquées par un therm. à air, et corrigées de la dilatation du verre.	VOLUMES correspondans d'une même masse d'air.
— 36°	— 36°	0,8650
0	0	1,0000
100	100	1,3750
150	148,70	1,5576
200	197,05	1,7389
250	245,05	1,9189
300	292,70	2,0976
Ebull. du merc. 360	350,00	2,3125

La première colonne représente les températures indiquées par le thermomètre à mercure.

La seconde colonne représente les températures correspondantes indiquées par un thermomètre à air, que l'on suppose gradué comme le thermomètre à mercure; c'est-à-dire que l'intervalle entre la glace fondante et l'eau bouillante est divisée en 100 parties égales, et que les divisions sont prolongées au dessus et au dessous de ces points. Seulement les degrés du thermomètre à mercure dépendent de la dilatation du mercure et de celle du verre qui lui sert d'enveloppe, tandis que les degrés du thermomètre à air sont corrigés de la dilatation du verre, que nous supposons connue.

La troisième colonne représente les volumes successifs que prend une même masse d'air sec, sous la même pression, en passant de la température 0, où son volume est égal à l'unité, aux températures qui sont exprimées dans les deux autres colonnes, soit en degrés du thermomètre à mercure, soit en degrés du thermomètre à air.

On voit que le thermomètre à air et le thermomètre à mercure sont parfaitement d'accord depuis — 36° jusqu'à + 100°; mais qu'au dessus de 100, le thermomètre à mercure prend l'avance; il marque 200, quand le thermomètre à air ne marque que 197,05: ce qui fait une différence d'environ 3°; cette différence est plus que double, en passant de 200 à 300; et enfin elle est de 10°, en passant de 100 à 360°, puisque le thermomètre à air ne marque alors que 350.

164. L'appareil que MM. Dulong et Petit ont employé pour parvenir à ces résultats est représenté *Fig.* 156, 157 et 158; il se compose d'une caisse rectangulaire en cuivre rouge, de 7 décimètres de longueur, de 1 décimètre de largeur et de 1 décimètre de profondeur, que l'on remplit d'une huile fixe, et que l'on ajuste sur un fourneau propre

à en chauffer également toutes les parties. On en voit la coupe verticale dans la *Fig.* 157, et le plan ou la coupe horizontale dans la *Fig.* 158. Le couvercle est percé de plusieurs trous, les uns destinés à recevoir des thermomètres, les autres des tiges armées de volans, qui mêlent le liquide par leur rotation, et qui établissent partout l'uniformité de température. L'une des petites faces latérales est percée de deux ouvertures de même grandeur et au même niveau : la première reçoit un thermomètre horizontal *bt*, et la seconde le tube à air *cac'*, qui est aussi horizontal ; ces deux instrumens sont dans la même couche de niveau, et la boule *b* du thermomètre correspond au milieu *a* de la longueur du tube. Avec cet appareil la dilatation de l'air a été observée de deux manières, par la mesure des volumes, et par la mesure des pressions.

165. *Dilatation de l'air par la mesure des volumes.*—Pour suivre ce procédé, on termine le tube à air *cac'* par un bec très-fin *c'*, qui doit sortir de la caisse de cuivre (*Fig.* 157 et 158). Ce tube étant rempli d'air sec, on le laisse ouvert, on le dispose dans l'appareil, on verse l'huile fixe qui doit être chauffée, et l'on élève graduellement la température. Lorsqu'on approche du degré de chaleur que l'on veut atteindre, on ferme le fourneau. La température monte encore ; elle arrive à un *maximum* où elle reste stationnaire pendant quelques instans ; et c'est alors que l'on fait les trois opérations d'où dépend le succès de l'expérience : on observe le thermomètre à mercure, on oberve le baromètre, et en même temps on ferme au chalumeau le bec *c'* du tube à air. Ensuite, l'appareil étant refroidi, on enlève le tube à air, on le porte dans un appartement dont la température est connue, on le retourne verticalement, la pointe en bas, dans une cuvette à mercure, et l'on brise l'extrémité du bec ; l'air refroidi n'ayant plus qu'une tension moindre que la pression atmosphérique, le mercure monte jusqu'à une certaine hauteur, que l'on mesure avec beaucoup de

soin. Après cela on fait trois pesées : 1° on pèse le tube et tout le mercure qu'il contient ; 2° on pèse le tube sans mercure ; 3° on pèse le tube rempli de mercure ; de cette dernière pesée, retranchant successivement la première et la deuxième, on a les poids des deux volumes de mercure : le premier égal au volume d'air refroidi, le second égal au volume total du tube, et par conséquent égal au volume d'air chaud qui le remplissait au moment où il a été fermé au chalumeau. En corrigeant ces résultats de la dilatation du verre et de la différence des pressions, l'on arrive enfin au rapport exact qui se trouve entre le volume de l'air chaud et le volume de l'air froid ; d'où l'on conclut la dilatation de l'air.

166. *Dilatation de l'air par la mesure des pressions.* — Pour suivre ce second procédé, on prend le tube à air qui est représenté dans la *Figure* 156 ; ce tube s'ajuste comme le premier ; seulement sa partie recourbée descend verticalement. On chauffe comme la première fois, et lorsqu'on est arrivé au *maximum* de température, au lieu de fermer l'extrémité du tube à air, on lui présente une petite capsule de mercure, et on laisse refroidir l'appareil. La tension de l'air diminuant, le mercure monte dans la branche verticale, et l'on mesure avec beaucoup de soin la hauteur à laquelle il s'arrête quand la température du refroidissement est devenue stationnaire ; de cette manière, en faisant la correction convenable, on connaît le volume et la pression de l'air chaud, le volume et la pression de l'air froid, et l'on en déduit la dilatation.

Les résultats de ces deux procédés se confirment l'un par l'autre, car ils s'accordent parfaitement entre eux, et montrent en même temps que la loi de Mariotte s'étend à toutes les températures.

L'hydrogène, qui est de tous les gaz celui qui diffère le plus de l'air atmosphérique, par sa constitution et par la plupart de ses propriétés, a cependant donné les mêmes

résultats, soit pour l'uniformité, soit pour la quantité de sa dilatation.

167. M. de Laplace explique ces résultats et les autres propriétés essentielles des gaz dans sa belle théorie des fluides élastiques, qui forme un des derniers livres de la Mécanique céleste.

CHAPITRE IV.

De la dilatation absolue du mercure, et de la dilatation apparente de quelques autres liquides.

168. MM. Dulong et Petit ont déterminé la dilatation absolue du mercure avec une grande précision. Leur appareil, qui est représenté *Fig.* 191, 192, 193, 194 et 195, repose sur ce principe d'hydrostatique (65), que deux colonnes liquides qui se font équilibre ont des hauteurs qui sont en raison inverse de leurs densités.

AT et A′T′, figure 195, sont deux tubes verticaux, communiquant par le tube horizontal TT′. On les remplit de mercure jusqu'à la hauteur nn'; l'action capillaire est nulle à cause de la grandeur des diamètres, et l'égalité des pressions s'établit parfaitement, quoique le tube TT′ soit très-étroit. Cet appareil repose sur une règle de fer FF′, qui repose elle-même sur une forte table en bois, que l'on met de niveau par le moyen des vis calantes vv'. Deux montans de fer f et f', portant des anneaux à clavette ac et $a'c'$, maintiennent les tubes dans une position bien verticale. Le montant f est terminé par un arc de fer, dont l'extrémité r doit servir de repère.

L'une des branches est maintenue à la température 0, l'autre est portée successivement à différentes températures; et tout se réduit dans ces recherches à mesurer exactement les hauteurs inégales des deux colonnes, et la température de la colonne dilatée.

169. Les hauteurs des colonnes au dessus de l'axe du tube TT′ se déterminent par un micromètre particulier,

représenté *figure* 192; il se compose d'une forte règle divisée, sur laquelle se meut une lunette. Cet appareil se dispose en M sur un pied solide en maçonnerie : la règle est verticale, la lunette horizontale; et l'on observe la course que doit prendre la lunette pour pointer successivement au repère r et aux sommets des deux colonnes. Connaissant, une fois pour toutes, la hauteur du repère au dessus de l'axe du tube TT', on en déduit les hauteurs du sommet de la colonne froide et du sommet de la colonne dilatée, au dessus du même axe.

170. Les températures se déterminent par la disposition qui est représentée figure 191. Un cylindre cc enveloppe le tube AT; on le remplit de glace pilée, et, au moyen de la petite fenêtre o, on peut pointer la lunette au sommet de la colonne. La température du montant f restant la même, le repère r reste parfaitement fixe. Un cylindre c'c' enveloppe pareillement le tube A'T'; on le remplit d'une huile fixe qui supporte plus de 300°, sans bouillir. Un fourneau, dont on a supprimé la figure dans toute la partie antérieure, sert à la chauffer à divers degrés. Deux thermomètres t et t' servent à marquer la température du bain d'huile, et par conséquent celle du mercure. Le premier t est un thermomètre à air, que nous avons décrit (166); le second t' est un thermomètre à mercure d'une espèce particulière; par la dilatation, le mercure s'échappe dans la petite capsule s : on le recueille, on le pèse, on compare son poids à celui du mercure qui est contenu dans le tube à la température 0, et en faisant les corrections nécessaires pour la dilatation du verre, on en déduit la température, comptée sur le thermomètre à mercure. Les températures et les hauteurs des colonnes s'observent rapidement, lorsqu'on a fermé toutes les issues du fourneau, et pendant l'état *maximum*, qui dure plusieurs instans.

171. Nous avons vu (159) que la dilation cubique est donnée par la formule

$$K = \frac{V_t - V_o}{t\, V_o}.$$

Ici nous connaissons t, et nous n'avons besoin de connaître ni V_o ni V_t; car les volumes sont en raison inverse des densités, et dans notre appareil les densités sont en raison inverse des hauteurs des colonnes; donc les volumes sont comme les hauteurs des colonnes, et H_o désignant la hauteur de la colonne du tube AT, qui est à la température 0, H_t désignant la hauteur de la colonne du tube A′T′ pour la température t, nous aurons

$$\frac{V_t}{V_o} = \frac{H_t}{H_o}$$

d'où

$$\frac{V_t - V_o}{V_o} = \frac{H_t - H_o}{H_o}$$

et par conséquent

$$K = \frac{H_t - H_o}{t\, H_o}.$$

C'est par ce moyen que MM. Dulong et Petit sont parvenus aux résultats suivans pour la dilatation cubique du mercure.

TEMPÉRATURES déduites de la dilatation de l'air.	DILATATIONS MOYENNES DU MERCURE, en volume		TEMPÉRATURES indiquées par la dilatation du mercure supposée uniforme.
	en fractions ordin.	en fractions décim.	
0°	0	0,0	0
100	$\frac{1}{5550}$	0,00018018	100
200	$\frac{1}{5425}$	0,00018433	204,61
300	$\frac{1}{5300}$	0,00018868	314,15

La première colonne contient les températures telles qu'on les déduit du thermomètre à air. La seconde colonne renferme, en fractions vulgaires, et en fractions décimales,

les dilatations moyennes absolues du mercure, entre la température o et chacune des températures indiquées dans la première colonne. Enfin la troisième colonne comprend les températures qu'on obtiendrait en supposant *uniforme* la dilatation du mercure, ou, en d'autres termes, celles qu'indiquerait un thermomètre construit avec ce liquide, en le renfermant dans un vase dont l'expansion suivrait la même loi que la sienne.

172. Nous verrons plus loin que la dilatation cubique du verre des thermomètres est à peu près uniforme, entre o et 100° comme celle du mercure, et qu'elle est de $\frac{1}{38700}$ ou 0,00002584 pour chaque degré centigrade. La dilatation du mercure entre ces limites étant de $\frac{1}{5550}$ ou 0,00018018, il en résulte que la *dilatation apparente* du mercure dans le verre est de 0,00015434 ou environ $\frac{1}{6479}$ pour chaque degré, et $\frac{1}{65}$ de o à 100°; car la dilatation apparente du mercure dans le verre n'est autre chose que la dilatation absolue de mercure diminuée de la dilatation absolue du verre.

173. La dilatation apparente de l'alcool dans le verre peut s'obtenir en observant la marche d'un thermomètre dont la boule est graduée, c'est-à-dire dont la boule a une capacité connue relativement aux divisions de la tige. Si la boule contient, par exemple, 1000 fois le volume qui correspond à la longueur de 1°, il est évident qu'un accroissement de 1° de température donne une dilatation apparente de $\frac{1}{1000}$. Il paraît, d'après les observations les plus exactes, que l'alcool très-rectifié se dilate, dans le verre, de 0,122536, depuis o à 100°: ce qui fait environ $\frac{1}{813}$ pour la dilatation moyenne correspondante à chaque degré; sur quoi il faut remarquer que la dilatation de l'alcool est loin d'être uniforme, et que cette dilatation moyenne est plus grande que la dilatation des basses températures, et plus petite que les dilatations voisines du point d'ébullition.

174. La dilatation apparente de l'eau dans le verre peut s'observer comme celle de l'alcool. On trouve qu'entre

0 et 100° elle est à peu près de 0,04386. Nous verrons, en parlant de la densité des liquides, que non-seulement la dilatation de l'eau est irrégulière, mais encore qu'elle offre un phénomène curieux de contraction à quelques degrés au dessus de 0. On voit que la dilatation apparente de l'eau entre 0 et 100° est à peu près triple de celle du mercure, et que celle de l'alcool est à peu près triple de celle de l'eau.

175. M. Gay-Lussac est parti d'un autre principe pour chercher quelque loi générale de la dilatation des liquides; au lieu de compter ces dilatations à partir d'une même température, comme celle de la glace fondante, il a pris pour chacun d'eux son point d'ébullition, et il a observé les contractions qu'ils éprouvent en se refroidissant d'un même nombre de degrés.

L'eau bout à	100°
L'alcool à	78°,41
Le sulfure de carbone à	46°,60
L'éther sulfurique à	35°,56

Ainsi, à ces températures différentes, les molécules de ces divers liquides ont des forces répulsives égales; et les lois de dilatation devant être essentiellement liées aux lois des actions moléculaires, on voit que le plus sûr moyen d'arriver à des résultats généraux est d'étudier les contractions qui correspondent à des mêmes abaissemens de température au dessous du point d'ébullition. On doit remarquer toutefois que, sous d'autres pressions, les points d'ébullition seraient différens et ne conserveraient entre eux ni les mêmes rapports ni les mêmes différences.

La table suivante contient les résultats auxquels est parvenu M. Gay-Lussac.

Table des contractions de 5 en 5 degrés, à partir du point d'ébullition de chaque liquide.

TEMPÉRATURES au-dessous du point d'ébullition.	EAU. Contraction.	ALCOOL. Contraction.	SULFURE DE CARBONE. Contraction.	ÉTHER. Contraction.
0°	0,00	0,00	0,00	0,00
5	3,34	5,55	6,14	8,15
10	6,61	11,43	12,01	16,17
15	10,50	17,51	17,98	24,16
20	13,15	24,34	23,80	31,83
25	16,06	29,15	29,65	32,14
30	18,85	34,74	3 ,06	46,42
35	21,52	40,28	40,48	52,06
40	24,10	45,68	45,77	58,77
45	26,50	50,85	51,08	65,48
50	28,56	56,02	56,28	72,01
55	30,60	61,01	61,14	78,38
60	32,42	65,96	66,21	
65	34,02	70,74		
70	35,47	75,48		
75	36,70	80,11		

La première colonne indique les températures au dessous du point d'ébullition de chaque liquide, décroissant de 5 en 5°.

Les quatre colonnes suivantes contiennent les contractions apparentes que l'eau, l'alcool, le sulfure de carbonne, et l'éther éprouvent dans le verre, en s'abaissant au dessous de leurs points d'ébullition, d'un nombre de degrés marqué par la première colonne. Le volume est représenté par 1000 pour le point d'ébullition ainsi à 10° au dessous, il est de 1000—6,61 pour l'eau, de 1000—11,43 pour l'alcool, de 1000—12,01 pour le sulfure de carbonne, et de 1000—16,17 pour l'éther.

« On voit par cette table, dit M. Gay-Lussac, 1° que

l'eau se dilate beaucoup moins que l'alcool et le sulfure de carbone, et ces deux liquides beaucoup moins que l'éther; 2° que l'alcool et le sulfure de carbone se dilatent également : ce n'est que dans les 15 premiers degrés qu'il y a une petite différence entre leurs dilatations; encore pourrait-elle être attribuée en partie à la difficulté de maintenir la température constante à ces degrés élevés. Dans le reste de l'échelle qui, pour le sulfure de carbone, s'étend à 60° au dessous de son point d'ébullition, ou à 13°,4 au dessous de la glace fondante, la concordance est parfaite. Frappé de ce résultat inattendu, et ne pouvant le rapporter ni à la densité ni à la volatilité très-différente des deux liquides, j'ai voulu m'assurer s'il ne dépendrait pas de la densité de leurs vapeurs. » Et en effet M. Gay-Lussac a découvert ce résultat très-remarquable, que l'alcool et le sulfure de carbone, qui se dilatent également, produisent aussi, à volume égal, des volumes égaux en vapeur.

CHAPITRE V.

De la dilatation des solides.

176. On peut déterminer directement la dilatation linéaire des corps solides ou leur dilatation cubique. Le premier moyen a paru le plus simple à la plupart des observateurs; et l'on voit en effet qu'il se réduit à transformer les substances solides en barres ou en tiges plus ou moins fortes, de 1 ou 2 mètres de longueur, à porter ces barres à des températures déterminées, et à mesurer les allongemens ou les contractions qu'elles éprouvent.

Pour produire une température connue et parfaitement uniforme dans toute l'étendue d'une barre dont on cherche la dilatation, on la dispose au fond d'une cuve ou d'une espèce d'auge rectangulaire, que l'on remplit ensuite de glace fondante, pour avoir la température 0, et d'une huile fixe ou d'un autre liquide, pour avoir des températures de plus en plus élevées. La barre est placée horizontalement, de peur que son poids ou des pressions inégales ne gênent ses mouvemens de dilatation, et elle repose sur des tubes de verre, comme sur des rouleaux, afin que le liquide puisse l'envelopper de toutes parts, et se renouveler autour d'elle. Tout l'appareil peut être chauffé avec des lampes à l'esprit-de-vin; mais le plus sûr est de l'établir sur un fourneau de briques qui lui conserve pendant long-temps la même température. Des volans servent à brasser et à mélanger le liquide, et des thermomètres disposés en différens points de sa longueur et à diverses profondeurs, servent à marquer la température moyenne à laquelle se fait chaque observation.

Pour observer les allongemens et les contractions de la barre, il y a surtout deux moyens qui paraissent donner le plus grand degré d'exactitude : celui de MM. Lavoisier et Laplace, et celui de Ramsden.

MM. Lavoisier et Laplace faisaient plonger verticalement jusqu'au fond de la cuve une règle de verre, appuyée dans sa partie supérieure contre de fortes traverses en fer, qui étaient elles-mêmes soutenues par des maçonneries en pierres de taille, d'une solidité parfaite. Le tranchant de cette lame de verre était un *talon fixe* contre lequel venait s'arrêter l'une des extrémités de la barre en expérience. A son autre extrémité, où devait se porter tout son allongement, elle était en contact avec un bras de levier très-court, qu'elle faisait tourner plus ou moins. Le point d'appui du levier était en dehors, conservant sa température et son immobilité ; on pouvait donc agrandir à volonté l'amplitude de la dilatation : en faisant, par exemple, le grand bras du levier, dont on observait les mouvemens, 1000 fois plus long que le petit bras qui était directement poussé ; on pouvait apercevoir des dix-millièmes ou même des cent-millièmes de millimètre.

Ramsden voulait éviter les frottemens du point d'appui et la flexibilité des bras de levier ; pour cela, il faisait sortir la dilatation hors de la cuve par un moyen très-ingénieux. A chaque extrémité de ses barres il ajustait une tige verticale inflexible et assez longue pour s'élever au dessus de l'appareil ; deux points marqués au sommet de ces tiges, et à la même hauteur, donnaient une distance toujours égale à la longueur de la barre. Ainsi la question était réduite à mesurer à chaque instant la distance de ces deux points : ce qui peut se faire de plusieurs manières et avec une grande précision.

177. MM. Dulong et Petit ont employé d'autres moyens, qui sont moins directs en apparence, mais qui donnent sans doute, entre des mains habiles, le dernier degré d'exacti-

tude auquel on puisse atteindre. C'est ici la dilatation absolue du mercure, qui est l'élément essentiel de toutes les autres déterminations. Avec cette donnée, à laquelle on arrive, comme nous l'avons vu dans le chap. IV, MM. Dulong et Petit ont cherché d'abord la dilatation du verre et celle du fer.

Pour le verre on prend un tube de 6 décimètres de longueur, contenant environ 700 grammes de mercure; ce tube est fermé à l'une de ses extrémités, et à l'autre, il est effilé en un bec très-fin, dont la capacité peut être négligée, par rapport à la capacité totale. On le remplit de mercure sec et purgé d'air, on le dispose horizontalement dans un bain d'huile fixe, que l'on peut chauffer à volonté; l'extrémité du bec sort du bain, et une partie du mercure s'échappe par l'effet de la dilatation. Le volume v du mercure, qui sort entre deux températures connues, n'est autre chose que la dilatation apparente du mercure dans le verre, ou $k - k'$; en désignant par k la dilatation absolue du mercure entre ces deux températures, et par k' la dilatation absolue du verre. On a donc

$$v = k - k',$$

d'où l'on déduit $$k' = k - v.$$

On pourrait obtenir le volume v en le jaugeant à la température 0, dans un tube gradué; mais il est plus exact de le déterminer par une pesée. Pour les valeur de k, elles se déduisent des nombres que nous avons rapportés (171). Il résulte de ces expériences, 1° que la dilatation cubique du verre est sensiblement uniforme entre 0 et 100°, et qu'elle est pour chaque degré de $\frac{1}{38700}$ du volume à 0; 2° qu'elle va croissant à mesure que la température s'élève, et que la moyenne pour chaque degré est de $\frac{1}{38300}$ entre 0 et 200°, et de $\frac{1}{37900}$ entre 0 et 300°. Des tubes de différentes fabriques ont donné le même résultat.

La dilatation du fer pourrait s'obtenir de la même manière, mais MM. Dulong et Petit ont préféré le moyen suivant. Une tige de fer a été fixée dans l'axe d'un tube pareil à celui de l'expérience précédente, et ensuite, après avoir rempli ce tube de mercure sec et purgé d'air, on l'a porté successivement aux températures de 100, 200 et 300°; on a recueilli le mercure qui s'est échappé, et on en a pris le poids. De cette manière, il y a trois corps qui concourent à l'expérience, savoir : le tube de verre, la tige de fer et le mercure qui remplit le tube; et il est facile d'avoir leur volume à 0. Le volume du verre s'obtient par le poids du mercure qu'il peut contenir; la volume de la tige de fer s'obtient en prenant son poids, et en le divisant par sa densité; enfin le volume du mercure n'est que la différence des deux premiers. Avec ces données, on déduit facilement la dilatatiou du fer entre la température 0 et une autre température connue. Par ce procédé, on a l'avantage d'arriver directement à la dilatation cubique, tandis qu'en y arrivant par la dilatation linéaire, on triple l'erreur dont la dilatation linéaire est elle-même susceptible.

On pourrait faire la même expérience sur tous les corps, en prenant soin seulement d'oxider leur surface pour les soustraire à l'action dissolvante du mercure; mais, connaissant une fois les dilatations précises de quelques solides, il y a un moyen sûr d'en déduire par comparaison les dilatations de tous les autres; c'est le moyen de Borda, duquel on a fait une si heureuse application dans la mesure de la méridienne; il consiste à assembler la règle dont on cherche la dilatation avec une règle d'une autre substance, dont la dilatation soit connue (*Fig.* 169). Cet assemblage forme le *pyromètre de Borda.*

Les deux règles sont posées l'une sur l'autre dans toute leur longueur; elles sont réunies d'une manière invariable, à l'une de leurs extrémités seulement, par une forte traverse en fer, à laquelle elles sont fixées solidement par des

vis. Chaque règle porte, à son autre extrémité, une tige de laiton qui s'élève d'abord verticalement, et ensuite se recourbe horizontalement. Les branches horizontales de ces deux pièces additionnelles peuvent glisser l'une sur l'autre, quand les deux règles s'allongent inégalement; et, sur la ligne où elles se joignent, elles sont divisées en parties égales très-petites, de manière que 20 divisions de l'une d'elles soient, par exemple, équivalentes à 19 divisions de l'autre; celle-ci portant, je suppose, des cinquièmes de millimètre, on pourra, par la coïncidence des divisions, estimer des vingtièmes de cinquièmes ou des centièmes de millimètres. Cette coïncidence s'observe à la loupe, comme dans les verniers ordinaires. Les règles de MM. Dulong et Petit avaient 12 décimètres de longueur, 25 millimètres de largeur et 4 millimètres d'épaisseur. Une différence de température de 1° produisait un déplacement correspondant à peu près à une partie du vernier. Le pyromètre étant porté, par exemple, de la température 0 à la température de 100°, les deux règles s'allongeaient inégalement, la pièce additionnelle de la plus dilatable glissait sur la pièce additionnelle de l'autre, par exemple, de 100 parties du vernier, qui formaient une longueur absolue de 1 millimètre. Connaissant ainsi la différence des dilatations linéaires des deux règles, connaissant d'ailleurs la dilatation linéaire de l'une d'elles, et sa longueur primitive, il était facile d'en déduire la dilatation linéaire de l'autre.

178. Nous avons réuni dans le tableau suivant les dilatations qui ont été déterminées par les plus habiles observateurs.

Tableau des dilatations des solides.

DÉSIGNATION des SUBSTANCES.	INTERVALLE de température	DILATATIONS EN FRACTIONS	
		décimales.	vulgaires.
Suivant MM. Lavoisier et Laplace.			
Flintglass anglais.	0 à 100°	0,00081166	1/1248
Platine (selon Borda).	» »	0,00085655	1/1167
Verre de France avec plomb. .	» »	0,00087199	1/1147
Tube de verre sans plomb. . .	» »	0,00087572	1/1142
Idem.	» »	0,00089694	1/1115
Idem.	» »	0,00089760	1/1114
Idem.	» »	0,00091750	1/1090
Verre de Saint-Gobain.	» »	8,00089089	1/1122
Acier non trempé.	» »	0,00107880	1/927
Idem.	» »	0,00107915	1/927
Idem.	» »	0,00107960	1/926
Acier trempé jaune, recuit à 65°.	» »	0,00123956	1/807
Fer doux forgé.	» »	0,00122045	1/819
Fer rond passé à la filière. . .	» »	0,00123504	1/812
Or de départ.	» »	0,00146606	1/682
Or au titre de Paris, recuit. .	» »	0,00151361	1/661
Idem, non recuit.	» »	0,00155155	1/645
Cuivre.	» »	0,00171220	1/584
Idem.	» »	0,00171733	1/582
Idem.	» »	0,00172240	1/581
Cuivre jaune ou laiton.	» »	0,00186670	1/535
Idem.	» »	0,00187821	1/533
Idem.	» »	0,00188970	1/529
Argent au titre de Paris. . . .	» »	0,00190868	1/524
Argent de coupelle.	» »	0,00190974	1/524
Étain des Indes ou de mélac.	» »	0,00193765	1/516
Étain de Falmoulth.	» »	0,00217298	1/462
Plomb.	» »	0,00284836	1/351
Suivant Smeaton.			
Verre blanc (tubes de barom.)	0 à 100	0,00083333	1/1175
Régule martial d'antimoine. .	» »	0,00108333	1/923
Acier poule.	» »	0,00115000	1/870
Acier trempé.	» »	0,00122500	1/816
Fer.	» »	0,00125833	1/795
Bismuth.	» »	0,00139167	1/719
Cuivre rouge battu.	» »	0,00170000	1/588
Cuivre rouge 8 part., étain 1. .	» »	0,00181667	1/550
Cuivre jaune fondu.	» »	0,00187500	1/533
Cuivre jaune 16 part., étain 1.	» »	0,00190833	1/524

DÉSIGNATION des SUBSTANCES.	INTERVALLE de température	DILATATIONS EN FRACTIONS décimales.	vulgaires.
Fil de laiton.	0 à 100°	0,00193333	1/517
Métal de miroir de télescope.	» »	1,00193333	1/517
Soudure, cuiv. 2, zinc 1 part.	» »	0,00205833	1/486
Étain fin.	» »	0,00228333	1/438
Étain en grains.	» »	0,00248333	1/403
Soudure blanche, étain 1 partie, plomb 2.	» »	0,00250533	1/399
Zinc 8 parties, étain 1, un peu forgé.	» »	0,00269167	2/372
Plomb	» »	0,00286667	1/349
Zinc.	» »	0,00294167	1/340
Zinc allongé au marteau de 1/12	» »	0,00310833	1/322
Suivant le major-général Roy.			
Verre en tube.	0 à 100	0,00077550	1/1289
Verre en verge solide.	» »	0,00080833	1/1237
Fer fondu (prisme de).	» »	0,00111000	1/901
Acier (verge d').	» »	0,00114450	1/874
Cuivre jaune de Hambourg. . .	» »	0,00185550	1/539
Cuivre jaune angl., en forme de verge.	» »	0,00189296	1/528
Cuivre jaune angl., en forme d'auge ou de canal rectang. .	» »	0,00189450	1/528
Suivant M. Troughton.			
Platine.	0 à 100	0,00099180	1/1008
Acier.	» »	0,00118990	1/840
Fer tiré à la filière.	» »	0,00144010	1/694
Cuivre.	» »	0,00191880	1/521
Argent.	» »	0,00208260	1/480
Suivant M. Wollaston.			
Palladium.	0 à 100	0,00100000	1/1000
Suivant MM. Dulong et Petit.			
Platine.	0 à 100	0,00088420	1/1131
	0 à 300	0,00275482	1/363
Verre.	0 à 100	0,00086133	1/1161
	0 à 200	0,00184502	1/544
	0 à 300	0,00303252	1/329
Fer.	0 à 100	0,00118210	1/846
	0 à 300	0,00440528	1/227
Cuivre.	0 à 100	0,00171820	1/582
	0 à 300	0,00564972	1/177

179. La dilatation des corps solides paraît, en général, très-sensiblement uniforme entre 0 et 100°; mais on peut juger, par les résultats de MM. Dulong et Petit, que pour des températures plus hautes, la dilatation devient toujours irrégulière et toujours croissante.

Dans une certaine étendue de l'échelle thermométrique l'acier trempé se contracte au lieu de se dilater; c'est une exception remarquable qui tient sans doute à l'état forcé où se trouvent les molécules. L'élévation de température leur donne plus de liberté pour se rapprocher et pour prendre la place qu'elles auraient prise, sans le refroidissement subit qui est venu les saisir, et donner à leur ensemble l'état particulier qui constitue la trempe. On peut tirer parti de cette propriété pour beaucoup d'applications utiles.

180. Connaissant les dilatations linéaires des corps solides, il est facile d'en déduire leurs dilatations cubiques, et de calculer ensuite tous les changemens de volume par lesquels doit passer un corps de forme et de dimensions données. Lorsqu'on examine les effets de la chaleur dans des corps diversement repliés sur eux-mêmes, ou dans des vases de diverses figures, on ne voit pas d'abord s'ils doivent s'agrandir ou se rétrécir, ni dans quel sens ils doivent éprouver ces changemens; mais, de l'ensemble des expériences, il paraît résulter ce principe général, qu'un espace quelconque, terminé par des parois d'une substance homogène, se dilate exactement comme se dilaterait une masse solide de même substance et de même forme. Ainsi le volume intérieur d'un tube de verre se dilate, comme le cylindre de verre qui serait capable de le remplir; la capacité intérieure d'une sphère se dilate comme la sphère massive qui la pourrait remplir, etc.

181. La *puissance de dilatation* d'un corps est égale à la *résistance de compression* dont il est capable. S'il faut un poids de mille kilogrammes pour réduire la longueur d'une barre de fer verticale autant que la réduirait un abaissement

de température de 1°, il est évident qu'en la chargeant à sa partie supérieure du poids de mille kilogrammes et en la chauffant de 1°, la dilatation due à la chaleur compensera la compression due à la charge, et sa longueur restera la même. C'est d'après ce principe que l'on peut juger des efforts prodigieux qu'exercent les corps en se dilatant ou en se contractant. Les liquides étant peu compressibles et très-dilatables sont, de tous les corps, ceux qui peuvent produire les plus grands effets de cette nature. Parmi les corps solides, le fer et la fonte ont pareillement une grande puissance de dilatation : c'est pour cela que dans les grands ouvrages où l'on doit mettre bout à bout des barres de fer sur une longueur de plusieurs centaines de mètres, on les ajuste de distance en distance, pour que l'extrémité d'une barre puisse s'engager dans l'extrémité de la barre suivante, sans la presser. Dans les tuyaux de conduite, l'ajustement est un peu plus difficile; mais on y parvient cependant avec des lames de plomb, dont on enveloppe l'extrémité du tuyau qui doit s'engager dans l'extrémité plus large du tuyau suivant.

182. La *puissance de contraction* des solides est égale à la *résistance de traction* qu'ils peuvent opposer. S'il faut un poids de mille kilogrammes pour donner à une barre de fer verticale un allongement égal à celui qu'elle prendrait pour une augmentation de température de 1°, il est évident que, si on la charge à son extrémité inférieure du poids de mille kilogrammes, et qu'en même temps on la refroidisse de 1°, la contraction du refroidissement compensera l'allongement de la traction, et la longueur restera la même que si la barre n'était ni refroidie de 1° ni tirée par mille kilogrammes. La tenacité du fer étant très-grande, on a pu profiter de cette propriété pour exercer des efforts qui auraient en quelque sorte surpassé nos autres moyens mécaniques. C'est ainsi, par exemple, que l'on voit, au conservatoire des arts et métiers, de longues barres de fer, traversant

deux murs opposés, et qui ont servi à rapprocher ces murs, malgré l'énorme pression qui les écartait de leur aplomb naturel. C'est à M. Molard que l'on doit cette ingénieuse application des lois du refroidissement. Les barres étant mises en place, on les chauffait dans toute leur longueur, et, tandis qu'elles étaient dilatées, on serrait des écrous qui étaient en dehors des murs; alors la puissance de contraction, produite par l'abaissement de température, rapprochait invinciblement les deux extrémités des barres, et par conséquent les obstacles qui s'y opposaient.

Comme une barre de métal se rompt sous un effort suffisant, elle se rompt pareillement par la contraction, quand ses extrémités sont tellement arrêtées, qu'elles ne puissent se rapprocher l'une de l'autre dans une proportion convenable. On en voit de trop fréquens exemples dans les longues pièces de métal qui sont mises en œuvre pendant les chaleurs de l'été, et qui ne sont pas scellées avec assez de précautions.

Les ingénieurs ont sans cesse occasion d'appliquer ces principes dans les grandes constructions dont ils sont chargés.

183. *Lame de compensation.* — Cet appareil se compose de deux ou de plusieurs lames de différente nature, qui sont clouées ou soudées dans toute leur longueur (*Fig.* 173, 174 et 175). Si l'une de ces lames est de fer et l'autre de cuivre, et qu'elles aient la même longueur à une température donnée, par exemple à 10°, il est évident qu'à 10° la lame de compensation sera droite, et qu'au dessus et au dessous de cette température elle sera courbée dans des sens différens. Au dessus de 10°, le cuivre *c* se dilatant plus que le fer *f*, le cuivre enveloppera le fer dans sa courbure (*Fig.* 175); au contraire, au dessous de 10°, le cuivre sera enveloppé par le fer, qui conservera plus de longueur (*Fig.* 173). Ces lames de compensation peuvent servir à une foule d'usages, et surtout à *compenser* les montres et les horloges.

184. Tout le monde sait que dans les chronomètres, comme dans les montres, c'est le ressort qui est le moteur, et le balancier qui est le régulateur. Par les changemens de température, toutes les pièces sont altérées dans leur volume, et la masse du balancier B (*Fig.* 189) est portée plus loin ou plus près de l'axe autour duquel elle fait ses oscillations. On conçoit donc qu'en y ajustant des lames de compensation l, l, qui se rapprochent du centre quand le cercle se dilate, et qui s'en éloignent au contraire, quand le cercle se contracte, on puisse atteindre à une assez juste compensation, pour se mettre complètement à l'abri des variations de température. Au lieu de faire porter la compensation directement sur la masse du balancier, on réussit mieux à produire l'isochronisme, en modifiant tantôt l'épaisseur, tantôt la longueur du ressort spiral que le balancier fait mouvoir. C'est ainsi que MM. Bréguet sont parvenus à faire des chronomètres d'une précision si surprenante, qu'en comparant leur marche à la marche des étoiles, on trouve que dans le cours d'une année les plus grands écarts de leurs variations diurnes ne s'élèvent pas à $1''$. C'est là, sans doute, le plus haut degré de perfection que l'art puisse donner à la matière dans des appareils si délicats et si compliqués.

185. Nous avons déja vu (52) que les horloges avancent ou retardent suivant qu'il fait plus froid ou plus chaud, et que, pour obvier à cet inconvénient, il faut empêcher le centre d'oscillation de remonter, quand la tige se refroidit, et de descendre quand elle se réchauffe. Les lames de compensation convenablement ajustées peuvent produire cet effet; il suffit pour cela que leur masse se relève et se rapproche du point de suspension, tandis que la masse de la lentille s'en éloigne, et *vice versâ*. Mais le pendule compensateur est d'un usage encore plus sûr et plus commode.

186. *Pendule compensateur.* — Cet appareil est représenté *fig.* 184. Les deux tiges extrêmes sont de fer : les deux tiges

moyennes sont de cuivre. Par la dilatation des premières, le centre d'oscillation descend ; au contraire, il est relevé par la dilatation des deux dernières ; et, lorsqu'on a la connaissance exacte des variations linéaires que ces métaux éprouvent, il suffit de quelques tâtonnemens pour produire une compensation très-exacte. Mais on conçoit que l'art difficile de l'horlogerie ne se réduit pas à fabriquer des horloges dont les pendules soient bien compensés. Il y a une telle correspondance entre toutes les pièces, une telle action de l'une sur l'autre, qu'il faut en quelque sorte que la compensation se fasse d'elle-même, sur chaque dent et sur chaque pivot des rouages. On sait quelle célébrité Berthoud et Bréguet se sont acquis dans toute l'Europe, et l'on peut juger de la perfection de leurs ouvrages, lorsqu'on sait qu'une pendule de Bréguet, par exemple, soumise à des variations de température, qui vont jusqu'à 12° ou 15° au dessous de 0, peut suivre le cours des astres pendant une année entière, sans se déranger de $\frac{1}{2}$ seconde.

187. La dilatation est une loi générale de la matière, et, s'il se trouve des corps qui, sous l'influence de la chaleur, semblent se soustraire à cette loi, on peut juger d'avance que c'est une exception dépendante de quelque circonstance particulière ; par exemple, si les substances végétales et animales se retirent sur elle-mêmes au lieu de se dilater, c'est qu'elles perdent par la chaleur quelques fluides, qui sont combinés avec elles d'une manière plus ou moins intime. Il en est de même des terres de différente espèce, qui sont plus ou moins imbibées d'eau ; elles semblent se contracter par la chaleur, mais cet effet résulte seulement de ce qu'elles se dessèchent encore plus qu'elles ne se dilatent.

CHAPITRE VI.

De la densité des gaz, des liquides et des solides.

188. Nous avons vu (45) que la pesanteur spécifique ou la densité d'un corps est le rapport de son poids à son volume. L'objet qu'on se propose dans la recherche des densités est moins de pouvoir trouver combien pèse un corps, sous un volume donné, que de pouvoir comparer entre elles les densités de tous les corps différens que nous présente la nature. On prend donc pour unité une densité connue, et l'on cherche combien de fois les autres la contiennent. L'unité que l'on choisit pour les gaz est la densité de l'air atmosphérique, parce que l'air se trouve partout, et que partout il se compose des mêmes élémens chimiques, combinés dans la même proportion. L'unité que l'on choisit pour les autres corps est la densité de l'eau distillée, parce que l'eau se trouve aussi partout, et qu'il est facile, en la distillant, de la rendre parfaitement pure. Ensuite le rapport entre la densité de l'air et celle de l'eau donne le moyen d'établir la comparaison entre les densités de tous les corps connus.

189. *Densité des gaz.* — A volume égal, les densités des corps sont entre elles comme leurs poids (45); ainsi, pour avoir les densités des gaz par rapport à l'air, il suffit de peser un volume d'air et un volume égal de tous les autres gaz, à la même température et sous la même pression. On y parvient en prenant un grand ballon de 8 ou 10 litres de capacité, que l'on pèse après y avoir fait le vide, et que l'on pèse ensuite après l'avoir rempli successivement d'air sec et des gaz de différente nature dont on veut avoir les densités. Comme il est impossible de faire le vide parfait, on tient compte, par le calcul, de la petite quantité d'air qui reste; et comme toutes les pesées ne peuvent se faire dans

des circonstances exactement pareilles, il y a de nombreuses corrections à faire pour les variations de température, de pression et d'humidité de l'air extérieur.

190. Nous avons rassemblé dans le tableau suivant les densités des gaz et des vapeurs.

Tableau des densités des gaz et des vapeurs.

DÉSIGNATION des FLUIDES ÉLASTIQUES.	DENSITÉS déterminées par expérience.	DENSITÉS calculées.	POIDS de 1 litre à 0° et 760 de pression.	NOMS des observateurs.
Air	1,0000		1,2991	
Gaz hydriodique	4,4288	4,3399	5,7719	Gay-Lussac.
chloroxi-carbonique		3,3990	4,4156	J. Davy.
chlore	2,4216	2,4260	3,2088	Gay et Thénard.
deutoxide de chlore		2,3155	3,0081	J. Davy.
sulfureux	2,1930		2,8489	H. Davy.
cyanogène	1,8064	1,8197	2,3467	Gay-Lussac.
protoxide d'azote	1,5269	1,5269	1,9752	Colin.
acide carbonique	1,5245		1,9805	Berzél. et Dulong.
hydro-chlorique	1,2474	1,2474	1,6205	Biot et Arago.
hydro-sulfurique	1,1912		1,5475	Gay et Thénard.
oxigène	1,1026		1,4323	Berzél. et Dulong.
deutoxide d'azote	1,0388	1,0390	1,3495	Bérard.
hydrogène-bi-carburé		0,9816	1,2752	Thomson.
azote	0,9757		1,2675	Berzél. et Dulong.
oxide de carbone	0,9569	0,9732	1,2431	Cruikshancks.
hydrogène per-phosphoré	0,9022			Thomson.
hydrog. proto-phosphoré	0,8700			H. Davy.
ammoniacal	0,5967	0,5910	0,7752	Biot et Arago.
hydrogène proto-carburé		0,5596	0,7270	Thomson.
hydrogène	0,0688		0,0894	Berzél. et Dulong.
Vapeur de perchlorure d'étain	9,200	8,993	11,951	Dumas.
d'iode	8,716	8,612	11,323	id.
de perchlorure de titane	6,856	7,047	8,881	id.
de mercure	6,976	6,978	9,062	id.
de proto-clorure d'arsenic	6,301	6,297	8,185	id.
de chlorure de silicium	5,939	5,960	7,715	id.
d'éther hydriodique	5,475	»	7,112	Gay-Lussac.
d'essence de térébenthine	5,013	4,211	6,512	id.
de protochlor. de phosphore	4,875	4,808	6,353	Dumas.
de chlorure de bore	3,942	4,079	5,121	id.
d'acide fluorique silicé	3,600	3,597	»	id.
d'hydro-bi-carb. de chlore	3,443	3,408	4,473	
nitreuse	»	3,180	4,132	Colin et Robiquet.
d'hydrogène arseniqué	2,695	2,695	3,502	Dumas.
de sulfure de carbone	2,645	»	3,436	Gay-Lussac.
d'éther sulfurique	2,586	2,583	3,395	id.
d'acide fluo-borique	2,312	2,307	»	id.
d'éther hydro-chlorique	2,2190	2,2290	2,8827	Thénard.
d'acide chloro-cyanique		2,1228	2,7577	Gay-Lussac.
d'alcoöl absolu	1,6133	1,6016	2,0958	id.
d'acide hydro-cyanique	0,9476	0,9442	1,2310	id.
d'eau	0,6235	0,6200	0,8100	id.
de carbone		0,4220	0,5482	

191. Les densités calculées se déduisent des combinaisons chimiques, par des considérations dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici.

192. Si l'on représente par D la densité d'un gaz à la température 0, sous la pression de 760^{mm}, et par D′ la densité du même gaz à la température de $t°$, sous la pression H, il est très-facile de trouver la relation qui existe entre les deux densités, les deux pressions et les deux températures. En effet, prenant, par exemple, 1 centimètre cube du gaz dans les premières circonstances, ce centimètre cube deviendra $1 + at$, en passant à la température t (a étant le coefficient de dilatation 0,00375), et en passant de la pression 760 à la pression H, ce volume deviendra

$$\frac{(1 + at)\,760}{H},$$

puisque les volumes sont en raison inverse des pressions. Or, le poids restant le même, les densités sont en raison inverse des volumes, donc

$$D : D' :: \frac{(1 + at)\,760}{H} : 1;$$

d'où

$$D' = D\frac{H}{760\,(1 + at)}.$$

Un autre gaz dont la densité serait D_1 à la température 0, sous la pression de 760, et D'_1 à la température t, sous la pression H, donnerait pareillement

$$D'_1 = D_1\frac{H}{760\,(1 + at)};$$

d'où il résulte

$$\frac{D'}{D'_1} = \frac{D}{D_1};$$

c'est à-dire que les densités des gaz conservent le même rapport à toute température et à toute pression. Ainsi, à

la température rouge, comme la température 0, sous la pression de 100 atmosphères, comme sous la pression d'une seule atmosphère, la densité de l'hydrogène, par exemple, sera toujours 0,0688 ou environ $\frac{1}{15}$ de la densité de l'air, soumis aux mêmes circonstances. Cette vérité fondamentale est facile à comprendre directement, lorsqu'on se rappelle que la loi de Mariotte, pour la compression, et la loi de M. Gay-Lussac, pour la dilatation, sont deux lois communes à tous les gaz, quelle que soit leur nature.

193. Avec les données précédentes, on peut trouver, par un calcul très-simple, la densité d'un mélange gazeux, formé dans des proportions connues en poids ou en volumes. Réciproquement, la densité d'un mélange étant connue, on en peut déduire la densité, le poids ou le volume de l'un de ses élémens, lorsque toutes les autres choses sont déjà déterminées.

194. *Densité de l'eau distillée.* — Tous les corps changent de volume à chaque instant, par l'influence de la chaleur; ainsi à chaque instant ils changent de densité. Mais dans la loi de ces variations, l'eau présente une exception remarquable : à partir de 0, lorsqu'on élève sa température, elle se retire sur elle-même, au lieu de se dilater, et elle se retire de plus en plus, jusqu'à la température d'environ 4°; ensuite, en la chauffant davantage, elle commence à éprouver une expansion, comme font tous les autres corps, et, dès cet instant, sa dilatation est continuellement croissante jusqu'à l'ébullition. Vers la température de 4°, l'eau éprouve donc un *maximum de contraction*. Ce phénomène est frappant, lorsqu'on l'observe sur un thermomètre à eau, dont chaque degré occupe une assez grande étendue. Ce thermomètre descend comme le thermomètre à mercure, lorsqu'on les plonge ensemble dans un bain liquide, qui est, par exemple, à 10°, et que l'on refroidit peu à peu; mais, aux approches du 4e degré, le refroidis-

sement augmentant, et le thermomètre à mercure continuant de descendre, on voit le thermomètre à eau qui remonte, comme si on le chauffait, et qui remonte ainsi jusqu'à la température de la glace. En poussant le refroidissement plus loin, l'eau du thermomètre se gèle, et prend tout à coup un accroissement de volume très-considérable; on peut donc présumer qu'à partir de 4° les molécules liquides commencent à s'écarter l'une de l'autre, et qu'elles se préparent en quelque sorte à prendre les positions respectives qu'elles doivent avoir pour passer à l'état solide. L'eau qui tient en dissolution quelques sels, ou d'autres substances étrangères, paraît présenter encore les propriétés du maximum de contraction et de l'accroissement de volume, par la congélation; mais, comme elle se gèle à une température plus basse que o, c'est aussi à une température plus basse que 4° qu'elle éprouve son maximum de contraction. Ces phénomènes ne semblent d'abord que des exceptions fortuites et de peu d'importance; mais nous verrons plus tard qu'ils ont une grande influence sur la distribution de la chaleur dans l'étendue des mers et de tous les continens. C'est par là que dans les latitudes élevées, les rivières, les lacs et les mers peuvent rester liquides à une certaine profondeur; c'est par là que les êtres vivans qui peuplent les eaux peuvent se conserver dans toutes les saisons et se perpétuer; c'est par là enfin qu'il s'établit une circulation de chaleur entre les pôles et l'équateur, et une température moyenne qui est plus modérée dans tous les climats.

Le point précis du maximum de contraction, et les différentes densités de l'eau, à diverses températures, ont été l'objet d'un grand nombre de recherches. Entre tous les résultats qui ont été donnés par tant d'habiles observateurs, nous choisirons ceux de M. Hallstrom, qui se recommandent par la rigueur de la méthode, et par l'exactitude des expériences. Voici le tableau de ses résultats.

Densités et volumes de l'eau de 0 *à* 30° *centigrades.*

Température	EN PRENANT POUR UNITÉS LA DENSITÉ ET LE VOLUME A 0.		EN PRENANT POUR UNITÉS LA DENSITÉ ET LE VOLUME A 4° 1.	
	Pesanteurs spécifiques.	Volumes.	Pesanteurs spécifiques.	Volumes.
0°	1,0	1,0	0,9998918	1,0001082
1	1,0000466	0,9999536	0,9999382	1,0000617
2	1,0000799	0,9999202	0,9999717	1,0000281
3	1,0001004	0,9998996	0,9999920	1,0000078
4	1,00010817	0,9998918	0,9999995	1,0000002
4,1	1,00010824	0,99989177	1,0	1,0
5	1,0001032	0,9998968	0,9999950	1,0000050
6	1,0000856	0,9999144	0,9999772	1,0000226
7	1,0000555	0,9999445	0,9999472	1,0000527
8	1,0000129	0,9999872	0,9999044	1,0000954
9	0,9999579	1,0000421	0,9998497	1,0001501
10	0,9998906	1,0001094	0,9997825	1,0002200
11	0,9998112	1,0001888	0,9997030	1,0002970
12	0,9997196	1,0002804	0,9996117	1,0003888
13	0,9996160	1,0003841	0,9995080	1,0004924
14	0,9995005	1,0004997	0,9993922	1,0006081
15	0,9993731	1,0006273	0,9992647	1,0007357
16	0,9992340	1,0007666	0,9991260	1,0008747
17	0,9990832	1,0009176	0,9989752	1,0010259
18	0,9989207	1,0010805	0,9988125	1,0011888
19	0,9987468	1,0012548	0,9986387	1,0013631
20	0,9985615	1,0014406	0,9984534	1,0015490
21	0,9983648	1,0016379	0,9982570	1,0017560
22	0,9981569	1,0018465	0,9980489	1,0019549
23	0,9979379	1,0020664	0,9978300	1,0021746
24	0,9977077	1,0022976	0,9976000	1,0024058
25	0,9974666	1,0025398	0,9973587	1,0026483
26	0,9972146	1,0022932	0,9971070	1,0029016
27	0,9969518	1,0030575	0,9968439	1,0031662
28	0,9966783	1,0033328	0,9965704	1,0034414
29	0,9963941	1,0036189	0,9962864	1,0037274
30	0,9960993	1,0039160	0,9959917	1,0040245

M. Hällström trouve le maximum de contraction à 4°,108; mais en discutant toutes les probabilités des erreurs, il pense que, dans cette détermination difficile, on peut se tromper de 0°,238, en plus ou en moins. Nous adopterons donc 4°,1 comme étant le nombre qui est probablement

le plus exact. Dans le premier tableau, on a pris pour unité la densité à o, et le volume à o; dans le second, on a pris pour unité la densité maximum et le volume minimum, c'est-à-dire à 4°,1. C'est par le principe d'Archimède (95) que M. Hallström est parvenu à ces résultats. Le corps plongé qu'il employait était une boule creuse de verre, lestée avec du sable, de manière à être très-peu pesante dans l'eau; il la suspendait par un cheveu à une balance hydrostique très-sensible, et il cherchait les diverses pertes de poids qu'elle éprouvait dans l'eau, à toutes les températures comprises entre o et 30°. La dilatation du verre étant déterminée d'avance avec beaucoup de soin, il pouvait calculer pour chaque expérience le volume et le poids de l'eau déplacée, et par conséquent sa densité.

195. *Densité des liquides.* — Le principe d'Archimède, servant à comparer entre elles les densités de l'eau à diverses températures, peut servir pareillement à trouver les densités de tous les liquides. Si l'on veut, par exemple, connaître la densité de l'alcool par rapport à celle de l'eau, il suffira de prendre un corps solide plus dense que ces liquides, et d'en faire trois pesées successives : la première dans l'air, la seconde dans l'eau, et la troisième dans l'alcool. La perte de poids que ce corps fait dans l'eau est égale au poids de l'eau qu'il déplace (95), et la perte de poids qu'il fait dans l'alcool est pareillement égale au poids de l'alcool. Or, la température étant la même, les volumes des liquides déplacés sont aussi les mêmes, donc le rapport de leur poids est égal au rapport de leur densité. Quand les pesées sont faites à des températures différentes, on les réduit, par le calcul, à ce qu'elles seraient à la température o; mais pour cela il faut connaître la loi de dilatation du corps plongé et celle de chaque liquide.

On peut déterminer aussi la densité des liquides par les *pesées directes* d'un même volume de tous ces corps. Pour y parvenir par ce second procédé, on prend un petit flacon

de verre, ayant un bouchon à l'émeri, qui le ferme d'une manière très-exacte; on le pèse seul, et on le pèse ensuite rempli d'un liquide : la différence des poids est le poids du liquide qu'il contient.

Par exemple : Le flacon seul pèse 100 gr.
Le flacon plein d'eau à 0 pèse 200 gr.
Le poids de l'eau contenue dans le flacon est 100 gr.
A la même température de 0
Le flacon seul pèse toujours 100
Le flacon plein d'alcool pèse 179
Le poids de l'alcool contenu dans le flacon est 79

Les volumes d'eau et d'alcool étant les mêmes, les densités de ces liquides sont entre elles comme les poids; donc la densité de l'alcool est 0,79.

Lorsque la température n'est pas 0, il faut corriger les résultats des effets que produit la dilatation, sur le verre du flacon et sur les liquides que l'on soumet à l'expérience.

196. Le tableau suivant contient les résultats les plus usuels.

Densité des liquides, en prenant pour unité la densité de l'eau à 0.

Acide sulfurique	1,8409	Vin de Bourgogne	0,9915
Acide nitreux	1,5500	Huile d'olive	0,8153
Eau de la mer Morte	1,2403	Ether muriatique	0,8740
Acide nitrique	1,2175	Huile essentielle de térébenthine	0,8697
Eau de la mer	1,0263	Bitume liquide de *naphte*	0,8475
Lait	1,0300	Alcool absolu	0,7920
Eau distillée	1,0000	Ether sulfurique	0,7155
Vin de Bordeaux	0,9939		

197. *Des Aréomètres.* — Les aréomètres sont des flotteurs qui donnent immédiatement les densités des liquides dans lesquels ils s'enfoncent.

On distingue deux sortes d'aréomètres, les aréomètres à poids variable, et les aréomètres à volume variable.

La *figure* 186 représente un *aréomètre à poids variable*; v est le *volume* ou le *corps* de l'instrument; on le fait en verre ou en fer-blanc; L est le *lest*, c'est-à-dire une petite masse de mercure ou de plomb, que l'on ajuste la partie inférieure; *t* est la *tige*, qui doit être très-déliée; enfin *c* est le *chapeau* sur lequel on doit mettre des poids. Quand l'instrument est dans un liquide, il se dispose d'après les conditions d'équilibre des corps flottans (97); il se tient debout à cause du leste qui rebaisse son centre de gravité, et il s'enfonce jusqu'à ce qu'il y ait égalité entre son poids et le poids du liquide qu'il déplace; alors on ajoute des *poids additionnels* sur le chapeau, pour *affleurer* l'instrument, c'est-à-dire pour qu'un petit trait *f*, marqué sur la tige, se trouve exactement *à fleur d'eau*. Dans les différens liquides, il faut des poids différens pour produire l'affleurement, et c'est pour cela qu'on l'appelle un aréomètre à poids variable. Soit P le poids de l'instrument, soient *p* les poids additionnels qu'il faut y ajouter pour l'affleurer dans l'eau à 0, soient *p'* les poids additionnels qu'il faut y ajouter pour l'affleurer dans l'alcool à 0, la densité de l'alcool sera à la densité de l'eau, comme $P + p'$ est à $P + p$.

L'aréomètre est d'autant plus sensible, que le volume plongé est plus considérable, et que la tige est plus fine.

On conçoit que, pour éviter les calculs, il est possible de former, pour chaque instrument, une table particulière, où l'on trouve immédiatement la densité à côté du poids additionnel *p'*.

198. L'*aréomètre à volume variable* est représenté *figure* 188; il a en général moins de volume que l'aréomètre à poids variable; la tige est un petit tube de verre creux; le corps de l'instrument est une boule soufflée à l'extrémité du tube; et le lest se loge dans le petit appendice en verre qui est au dessous de la boule; une bande de papier est soigneusement fixée dans l'intérieur de la tige, pour porter les divisions qui marquent les densités. Le poids de cet aréomètre

étant constant, il en résulte que les densités des liquides dans lesquels il s'enfonce, sont entre elles en raison inverse des volumes plongés. C'est d'après ce principe que l'on fait la graduation, et l'on écrit sur la bande de papier qui sert d'échelle les nombres qui expriment directement les densités des liquides. Ainsi quand l'aréomètre n'enfonce que jusqu'au nombre 1200, la densité est 1200, s'il enfonce jusqu'au nombre 900, la densité est 900, etc.; la densité de l'eau est représentée par 1000.

199. Les *pèse-liqueurs* sont des espèces d'aréomètres, qui ne sont pas gradués pour donner les densités des liqueurs dans lesquelles on les plonge, mais seulement pour donner leur *degré de concentration*. Les *acides* sont *étendus* d'une quantité d'eau plus ou moins grande, les *dissolutions salines* sont plus ou moins *saturées*, les *eaux-de-vie* et les *esprits* sont plus ou moins *riches en alcool*; et l'on a fait des *pèse-acides*, des *pèse-sels* et des *pèse-esprits*, pour reconnaître immédiatement les différens états dans lesquels ces liquides peuvent se présenter.

Pèse-acide ou *aréomètre de Beaumé*. — Cet aréomètre a toute l'apparence d'un aréomètre à volume variable; mais il en diffère essentiellement par sa graduation. Au point où il s'arrête dans l'eau pure, on marque 0; au point où il s'arrête dans un mélange de 85 parties d'eau et de 15 de sel ordinaire, on marque 15, on divise l'intervalle en 15 parties, et l'on continue les divisions au dessous. Deux dissolutions saturées à divers degrés marqueront évidemment des degrés différens sur l'aréomètre; la plus saturée marquera des degrés plus élevés, mais on n'en pourra rien conclure directement, ni sur les densités réelles de ces dissolutions, ni sur les proportions de sel qu'elles contiennent.

Les *pèse-sels* et les *pèse-esprits* sont gradués d'après des principes analogues; ils sont donc, comme le *pèse-acide*, des instrumens de commerce, plutôt que des instrumens de physique; car le degré aréométrique sert à régler le cours

des marchandises, sans rien indiquer sur la juste proportion des élémens qui les constituent.

200. *L'Alcoomètre centésimal de M. Gay-Lussac* est fondé sur de tout autres principes. Etant donné des esprits ou des eaux-de-vie, il suffit d'y plonger l'alcoomètre, pour connaître à l'instant leur force réelle, leur richesse en alcool et leur densité. Cet instrument, qui offre d'immenses avantages à la régie et au commerce, repose sur des recherches très-précieuses pour la science; son utilité, déjà démontrée par l'usage, a été sanctionnée par une loi. Il est nécessaire, pour en prendre une juste idée, de consulter *l'instruction pour l'usage de l'alcoomètre centésimal* que M. Gay-Lussac a publiée en 1824.

201. *Densité des corps solides.* — On détermine les densités des solides, comme celles des liquides, par trois procédés différens, savoir : au moyen de l'aréomètre, du flacon bouché ou de la balance hydrostatique.

202. L'aréomètre que l'on emploie pour déterminer les densités des corps solides, est un aréomètre à volume constant, qui s'appelle tantôt aréomètre de *Fahrenheit*, aréomètre de *Nicholson*, ou aréomètre-balance de *Charles*, suivant quelques légères modifications dans la disposition des pièces. Les *figures* 186 et 187 représentent l'aréomètre de Charles. Entre le corps v de l'instrument et le lest L, se trouve un petit panier ou un petit seau d'argent, destiné à recevoir les fragmens de matière dont on cherche la densité. Quand les corps sont plus pesans que l'eau, ils doivent exercer une pression de haut en bas; et le panier est accroché par l'anse (*Fig.* 186), afin de recevoir cette pression; quand les corps sont spécifiquement plus légers que l'eau, ils doivent exercer une pression de bas en haut, et alors on retourne le panier et on l'accroche par le fond (*Fig.* 187), afin qu'il reçoive encore cette pression.

Pour trouver une densité par ce moyen, il faut, avant tout, connaître le *poids additionnel* qui doit être mis sur le

chapeau, pour affleurer l'instrument (197) dans l'eau distillée, c'est-à-dire pour le faire enfoncer jusqu'au trait f que porte la tige. Supposons qu'à la température o le poids additionnel soit de 25 grammes, et avec cette donnée, cherchons la densité d'un corps quelconque, d'un diamant, par exemple. On met le diamant seul sur le chapeau, et on ajoute successivement des poids, jusqu'à produire l'affleurement : soit $23^{gr.},8$, ce qu'il faut ajouter; ces poids et le diamant équivalent ensemble à $25^{gr.}$, puisque l'affleurement a lieu. Donc le diamant pèse $25^{gr.} - 23,8$ ou $1^{gr.},2$; tel est son poids dans l'air. Alors on met le diamant dans le panier d'argent, et aux $23_{gr.},8$ qui sont restés sur le chapeau on ajoute ce qui est nécessaire pour l'affleurement ; $0^{gr.},34$ suffisent pour cet effet, donc $0^{gr.},34$ représentent le poids que le diamant perd dans l'eau, et par conséquent le poids d'eau qu'il déplace (95) ou le poids d'un volume d'eau qui est égal au sien. Or, à volume égal, les densités sont entre elles comme les poids (45) ; donc la densité du diamant est $\frac{1,32}{0,34}$ ou 3,53.

Pour les corps plus légers que l'eau, le procédé est le même; avec cette seule différence, qu'il faut retourner le panier et l'accrocher par le fond ; il n'y a rien à changer ni dans les raisonnemens ni dans les calculs. Lorsque la température n'est pas o, on fait les corrections.

203. Le flacon bouché qui sert à la recherche des densités, peut contenir environ 2 ou 3 décilitres d'eau. L'exactitude de l'expérience dépend en grande partie de la précision avec laquelle le bouchon est travaillé : il faut qu'il soit légèrement conique, bien usé à l'émeri, et parfaitement circulaire dans tout son contour, afin qu'il s'enfonce exactement de la même quantité dans toutes ses positions. Alors on procède de la manière suivante : on fait trois pesées; la première pour avoir le poids s du corps solide dont on cherche la densité, la seconde pour avoir le poids $F_e + s$ du flacon plein d'eau et du corps solide mis à côté de lui dans

le même bassin, la troisième pour avoir le poids F_i du flacon et du corps solide mis dans son intérieur, et par conséquent ayant chassé un volume d'eau égal au sien. La troisième pesée retranchée de la deuxième, c'est-à-dire $F_e + s - F_i$ donne le poids du volume d'eau chassé; et puisqu'à volume égal les densités sont comme les poids (45), la densité du corps est $\frac{s}{Fe + s - Fi}$. Quand la température n'est pas 0, il faut faire les corrections : ce procédé ne peut s'appliquer qu'à de petites masses; il importe peu qu'elles soient spécifiquement plus pesantes ou plus légères que l'eau.

Les corps qui sont solubles dans l'eau se pèsent dans l'alcool, dans le mercure ou dans un autre liquide de densité connue.

Les corps poreux et susceptibles de s'imbiber ont des densités variables suivant le degré d'imbibition. Il est difficile de les déterminer avec exactitude.

204. La balance hydrostatique qui nous a servi (95) à démontrer le principe d'Archimède peut nous servir aussi à trouver les densités des corps solides. Pour l'employer à cet usage, elle n'a besoin d'aucune modification. Le procédé se réduit à faire deux pesées; par la première on trouve le poids s du corps, par la seconde on trouve la perte de poids E qu'il éprouve dans l'eau; cette perte de poids est le poids du volume d'eau déplacé (95) : donc la densité est $\frac{s}{E}$. Si la température n'est pas 0, on fait les corrections.

205. Nous avons rassemblé dans le tableau suivant les densités les plus authentiques et auxquelles on est obligé de recourir le plus souvent; elles ont été déterminées par l'un ou l'autre des trois procédés dont nous venons de parler.

Table de la densité des corps solides à 0 de température, en prenant pour unité la densité de l'eau.

Platine écroui	23,0000	Saphir du Brésil	3,9941
Platine laminé	22,6690	Topaze de Saxe	3,5640
Platine passé à la filière	21,0417	Béryl oriental	3,5489
Platine forgé	20,3376	Diamans les plus lourds (légèrement colorés en rose)	3,5310
Platine purifié	19,5000	— les plus légers	3,5010
Or... forgé	19,3617	Flint-glass (anglais)	3,3293
Or... fondu	19,2581	Spath fluor (rouge)	3,2911
Iridium	18,600	Tourmaline (verte)	3,1555
Tungstène	17,6000	Asbeste roide	2,9058
Mercure à 0°	13,5980	Marbre de Paros (chaux carbonatée lasscllaire)	2,8376
Plomb fondu	11,3523	Quartz jaspe-onyx	2,8160
Palladium	11,3000	Emeraude verte	2,7755
Rhodium	11,0000	Perles	2,7500
Argent fondu	10,4743	Chaux carbonatée cristallisée	2,7182
Bismuth fondu	9,8220	Quartz jaspe	2,7101
Cuivre en fil	8,8785	Corail	2,6800
Cadmium	8,694	Cristal de roche pur	2,6530
Molybdène	8,6110	Quartz agate	2,6150
Laiton	8,395	Feld-spath limpide	2,5744
Arsenic	8,3080	Verre de Saint-Gobain	2,4882
Nickel fondu	8,2790	Porcelaine de la Chine	2,3847
Urane	8,1000	Chaux sulfatée cristallisée	2,3117
Acier non écroui	7,8163	Porcelaine de Sèvres	2,1457
Cobalt fondu	7,8119	Soufre natif	2,0332
Fer en barre	7,7880	Ivoire	1,9170
Étain fondu	7,2914	Albâtre	1,8740
Fer fondu	7,2070	Anthracite	1,8000
Zinc fondu	6,8610	Phosphore	1,770
Manganèse	6,85	Alun	1,7200
Antimoine fondu	6,7120	Pouille compacte	1,3292
Tellure	6,1150	Jayet	1,2590
Chrôme	5,9000	Succin	1,078
Iode	4,9480	Sodium	0,9726
Spath pesant	4,4300	Potassium	0,8651
Jargon de Ceylan	4,4161	Bois de hêtre	0,8520
Gelenium	4,320	Frêne	0,7450
Rubis oriental	4,2833		
Saphir oriental	4,2833		
Topaze orientale	4,0106		

If.	0,8070	Bois de cyprès.	0,5980
Bois d'orme	0,8000	Bois de cèdre	0,5610
Pommier	0,7330	Peuplier blanc d'Espagne .	0,5290
Bois d'oranger.	0,7050	Bois de sassafras	0,4820
Sapin jaune	0,6570	Peuplier ordinaire.	0,3830
Glace.	0,9300	Liége	0,2400
Tilleul.	0,6040		

206. *Observations.*—On voit, par l'exemple du platine et de l'or, qu'une même substance, au même état de pureté et à la même température, peut avoir des densités très-sensiblement différentes. La pression subite du balancier fait dans le métal des monnaies et des médailles le même effet que les coups répétés du marteau sur le platine, l'or et le fer; par ces effets mécaniques, les molécules se rapprochent, le métal s'écrouit, et sa densité augmente. Il paraît résulter de quelques expériences de M. Perkins que, sous des pressions de mille ou deux mille atmosphères, plusieurs corps solides, après s'être comprimés peu à peu, se réduisent en poudre impalpable, comme si leurs molécules, rapprochées à un certain degré, n'avaient plus assez de force répulsive pour se maintenir à la distance qui constitue l'état solide. Ainsi on peut conclure, par analogie, qu'il y a pour chaque substance une limite de densité qu'il est impossible de dépasser, quelque effort que l'on fasse pour porter les molécules à un plus grand degré de rapprochement.

On sait que la plupart des substances minéralogiques peuvent se présenter sous des aspects très-différens. La chaux carbonatée, par exemple, peut être à l'état de cristal régulier et transparent comme le verre, elle peut être à l'état de calcaire grossier, et, entre ces deux extrêmes, elle peut prendre des états d'agrégation très-variés, dont on peut juger par les nuances qui distinguent les marbres de différentes espèces. Or dans tous ces états la densité de la chaux carbonatée est loin d'être la même; et ce qui est digne de remarque, c'est que l'état cristallin le plus trans-

parent et le plus parfait paraît être aussi celui qui donne la plus grande densité.

Les substances végétales ont des densités très-variables, suivant leur âge, suivant le climat où elles naissent, et suivant la nature du sol qui les produit. Dans un même individu, les différentes couches, quoique composées sensiblement de la même manière, ont des densités différentes; les couches du centre sont toujours plus légères que les couches extérieures, soit à cause des nombreux vaisseaux qui s'y trouvent, soit à cause d'une texture particulière des fibres.

CHAPITRE VII.

Des Echelles thermométriques. — Des Thermomètres de différentes espèces et des Pyromètres.

207. Le thermomètre peut remplir des objets très-différens : premièrement, il peut servir à déterminer les températures auxquelles se manifestent les divers phénomènes dépendans de la chaleur ; secondement, il peut servir à évaluer numériquement ces températures, à les comparer entre elles comme on compare toutes les grandeurs, et à déduire de ces rapports les lois générales de la cause elle-même qui produit les phénomènes. Si l'on ne voulait atteindre que le premier objet, toute substance serait bonne pour la construction du thermomètre et toute division serait bonne pour sa graduation : il suffirait de s'entendre ; il suffirait que les observateurs de tous les pays voulussent bien choisir la même substance et adopter la même graduation. On pourrait même se dispenser d'employer des nombres pour marquer les degrés, car les nombres représenteraient alors des signes et non pas des grandeurs, et il serait tout aussi commode d'employer d'autres signes convenus, tels, par exemples, que les lettres de l'alphabet ou les notes de la musique, ou quelque autre signe bizarre imaginé à plaisir. Le sommet de la colonne thermométrique parcourrait les divers signes marqués sur la tige du thermomètre comme le soleil parcourt les signes du zodiaque ; et pour caractériser un phénomène il suffirait de marquer le point où la colonne se trouve, à l'instant où ce phénomène se produit. Mais lorqu'on veut atteindre le second objet, lorsqu'on

veut comparer les températures pour saisir les lois de leurs périodes ou de leurs accroissemens, il faut de toute nécessité que les températures soient exprimées par des grandeurs ou par des nombres; car nous ne pouvons comparer exactement que des grandeurs ou des nombres. Or, en adoptant le mode de graduation dont nous avons parlé (153), il est évident que le nombre qui exprime une température dépend du choix de la substance dont se compose le thermomètre; ainsi nous avons vu (163) que, le thermomètre à mercure marquant 200°, le thermomètre à air marque 197°,05. Et comme nous avons démontré (179) que toutes les substances solides ou liquides se dilatent irrégulièrement par rapport au thermomètre à air, et irrégulièrement entre elles, il en résulte que là où le thermomètre à air marquerait, par exemple, 300°, chaque substance marquerait un nombre différent: le thermomètre de verre marquerait 353, celui de fer 373, celui de cuivre 329, et celui de platine 312. Le tableau suivant renferme des comparaisons qui ont été faites par Deluc sur des thermomètres construits avec des liquides différens; elles ne s'étendent pas au dessus de 100°, mais dans ces limites les différences sont cependant si considérables qu'elles feront mieux sentir encore combien les valeurs numériques des températures dépendent du choix des substances.

Marche comparative des thermomètres construits avec différens liquides.

Mercure.	Huile d'olive.	Huile essentielle de camomille.	Huile essentielle de serpolet.	Eau saturée de muriate de soude.	Alcool très-rectifié.	Une partie d'alcool et une partie d'eau.	Une partie d'alcool et trois parties d'eau.	Eau.
80	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
75	74,6	74,7	74,3	74,1	73,8	73,2	71,6	71,0
70	69,4	69,5	68,8	68,4	67,8	66,2	62,9	62,0
65	64,4	64,3	63,5	62,6	61,9	60,6	55,2	53,5
60	59,3	59,1	58,3	57,1	56,2	54,8	47,7	45,8
55	54,2	53,9	53,3	51,7	50,7	49,1	40,6	38,5
50	49,2	48,8	48,3	46,6	45,3	43,6	34,4	32,0
45	44,0	43,6	43,4	41,2	40,2	38,4	28,4	26,1
40	39,2	38,6	38,4	36,3	35,1	33,3	23,0	20,5
35	34,*	33,6	33,5	31,3	30,3	28,4	18,0	15,9
30	29,3	28,7	28,6	26,5	25,6	23,9	13,5	11,2
25	24,3	23,8	23,8	21,9	21,0	19,4	9,4	7,3
20	19,3	18,9	19,0	17,3	16,5	15,3	6,1	4,1
15	14,4	14,1	14,2	12,8	12,2	11,1	3,4	1,6
10	9,5	9,3	9,4	8,4	7,9	7,1	1,5	0,2
5	4,7	4,6	4,7	4,2	3,9	3,4	0,1	—0,4
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
— 5				— 4,1	— 3,9			
—10				— 8,0	— 7,7			

La première colonne indique les degrés du thermomètre à mercure, d'après la division de *Réaumur*, l'intervalle entre la glace fondante et l'eau bouillante étant divisé en 80 parties seulement.

Les colonnes suivantes indiquent les degrés que marquent les autres thermomètres gradués de la même manière. Par exemple, le thermomètre à mercure marquant 20°, les autres marquent 19,3; 18,9; 19,0; 17,3; 16,5; 15,3; 6,1; 4,1. On peut juger par là de la discordance qui existe entre les instrumens composés de substances différentes.

Il est donc bien démontré que, pour découvrir des rapports simples entre les diverses températures auxquelles se produisent les phénomènes de même nature ou les diverses périodes d'un phénomène, il importe de construire le thermomètre avec telle substance plutôt qu'avec telle autre substance.

208. *Thermomètre à air.* — Les belles découvertes de MM. Dulong et Petit, dont nous parlerons un peu plus loin, ne laissent aucune incertitude sur l'espèce de substance que l'on doit choisir préférablement à toute autre; elles démontrent que le thermomètre à air ou à gaz conduit à des lois générales très-remarquables, et qu'il serait impossible d'arriver à ces lois, ou même de les exprimer en mesurant les températures avec des thermomètres d'une autre espèce.

209. *Thermomètre à mercure.* — Cependant les diverses dispositions que l'on peut donner au thermomètre à air, n'étant pas d'un usage commode, on emploie de préférence le thermomètre à mercure; on peut l'employer en toute sûreté depuis — 36° jusqu'à 100°, puisque dans ces limites il marche parfaitement d'accord avec le thermomètre à air (163); mais lorsque les températures sont plus hautes que 100° ou plus basses que — 36, il faut faire un calcul pour ramener les indications du thermomètre à mercure au nombre que donnerait le thermomètre à air auquel il faut toujours revenir comme à un type fondamental.

210. *Thermomètre à esprit de vin.* — Les thermomètres à esprit de vin, dont on fait un grand usage dans les observations météorologiques, ont l'avantage de descendre à des températures plus basses que les thermomètres à mercure, car il n'y a point de froid assez vif pour geler l'alcool rectifié; et en outre ils ont l'avantage, dans ces degrés inférieurs, de s'accorder assez bien avec le thermomètre à air. Cependant pour des recherches exactes il ne

faudrait employer le thermomètre à alcool au dessous de 0 qu'après s'être assuré de sa marche, comme MM. Dulong et Petit se sont assurés de la marche du thermomètre à mercure; et au dessus de 0 le thermomètre à esprit de vin est sensiblement en défaut, comme on en peut juger par la table précédente (207). Aussi toutes les fois que l'on donne des températures déterminées par ce thermomètre, il est nécessaire d'en prévenir.

211. Les thermomètres que l'on pourrait construire avec d'autres substances liquides donneraient des évaluations numériques de température qui ne pourraient servir de base à aucun calcul, à moins que l'on n'ait déterminé d'avance leur marche comparative pour substituer aux degrés qu'ils marquent les degrés que marquerait le thermomètre à air.

212. *Echelles thermométriques.* — Nous avons déjà dit (153) que les points fixes, généralement adoptés pour la graduation des thermomètres, sont celui de la glace fondante et celui de l'eau bouillante; mais l'intervalle compris entre ces points n'est pas toujours divisé de la même manière. Il y a trois modes de division qui donnent trois *échelles thermométriques* différentes, ou si l'on veut, trois espèces de thermomètre : le *thermomètre centigrade* et le *thermomètre de Réaumur*, qui sont en usage en France, et le *thermomètre de Fahrenheit*, qui est en usage en Angleterre.

Pour le thermomètre
centigrade on marque 0 à la glace et 100° à l'ébullition,
de Réaumur. 0. 80
de Fahrenheit. . . . 32. 212

Avec ces données il est facile de convertir les degrés de Réaumur et de Fahrenheit en degrés centigrades.

Puisque 80 R valent 100° *c.*
1° R vaut $\frac{5}{4}$ *c.*

Donc il suffit de multiplier par $\frac{5}{4}$ les degrés de Réaumur pour en faire des degrés centigrades; et réciproquement en multipliant par $\frac{4}{5}$ les degrés centigrades on en fera des degrés de Réaumur.

Puisque 180 F valent 100° *c.*

1° F vaut $\frac{5}{9}$ *c.*

Donc, une température en degrés de Fahrenheit étant donnée, il faut en retrancher 32, et multiplier le résultat par $\frac{5}{9}$ pour en faire des degrés centigrades.

213. *Thermomètre à maximum de M. Gay-Lussac.* — On appelle en général thermomètres à maximum, ceux qui peuvent conserver la marque des plus hautes et des plus basses températures qu'ils ont éprouvées pendant une période de temps quelconque. Ainsi un instrument de cette espèce étant abandonné à lui-même et exposé à l'action des causes extérieures pendant un jour, ou même pendant un mois ou une année, on pourra savoir, en l'observant après ce laps de temps, quel est le point le plus haut où il s'est élevé et le point le plus bas où il est descendu. Le thermomètre à maximum de M. Gay-Lussac est représenté *figure* 176; il se compose d'un ballon *b*, dont le col *cc* a été fermé à la lampe, et ensuite percé en son sommet d'une petite ouverture *v* extrêmement capillaire, et dont les parois doivent être très-minces. Autour du col du ballon, et à sa partie inférieure, on mastique un large tube *tt;* le ballon et la tube étant remplis d'eau ou d'alcool à une température donnée, on verse du mercure qui gagne le fond du tube et qui s'élève jusqu'au niveau *n*, mais qui ne pénètre pas dans le ballon à cause de la petitesse de l'ouverture *v*. Cela posé, si la température s'abaisse, il se fait un vide dans le ballon, la pression extérieure y pousse du mercure pour le remplir, et quand tout l'effet est produit, on renverse l'appareil avec précaution, on fait sortir le mercure en chauffant un peu la boule, et on le jauge en le versant

dans un tube qui est gradué pour cet usage. Le nombre des divisions que le mercure occupe dans ce tube à une température donnée, indique, au moyen d'une table dressée d'avance, quelle variation de température a dû supporter la boule.

Si la température s'élève au lieu de s'abaisser, le liquide sort du ballon, et le mercure n'y entre pas; mais alors on ramène l'appareil à sa température primitive, et par la quantité de mercure qui pénètre dans la boule pendant ce refroidissement, on juge du degré de chaleur auquel elle a dû être portée.

214. *Thermomètre à maximum de Rutherford.* — Il se compose de deux thermomètres, recourbés et ajustés sur la même monture (*Fig.* 190); le liquide du premier *bmt* est du mercure, le liquide du second *bat* est de l'alcool coloré en rouge avec du carmin. Les tiges *mt* et *at* doivent être horizontales quand l'instrument est en expérience; pour cela la monture tourne au moyen d'une charnière *c* autour de son pied, dont on n'a représenté qu'une partie.

Dans l'intérieur du thermomètre à mercure est un petit cylindre *f* en fer ou en acier qui sert d'index et qui peut couler dans la partie vide du tube sans éprouver trop de frottement. Quand la température s'élève, l'index est poussé par la colonne de mercure, et quand elle s'abaisse, l'index reste en place, car le mercure ne saurait l'entraîner dans sa retraite; ainsi la position de l'index de fer marque la plus haute température à laquelle l'instrument soit arrivé, c'est-à-dire le *maximum* qu'il ait pu atteindre.

Dans l'intérieur du thermomètre à alcool est un petit cylindre d'émail servant aussi d'index et coulant librement sans toucher les parois et sans faire piston; le liquide passe sans le pousser. Supposons, par exemple, que l'index d'émail soit au sommet de la colonne d'alcool et dans son intérieur, il est visible que, si la température s'abaisse,

l'index est pressé par le sommet de la colonne liquide, et se trouve forcé de le suivre dans tout son mouvement rétrograde ; mais à l'instant où la température redevient croissante, le liquide passe autour de l'index sans le pousser, le sommet de la colonne s'éloigne ; et l'index reste en place pour marquer la plus basse température à laquelle l'instrument soit arrivé, c'est-dire le *minimum*. Ainsi le thermomètre à mercure indique les *maximum*, et le thermomètre à alcool les *minimum*. Chacun d'eux a son échelle, graduée comme à l'ordinaire. Pour mettre l'instrument en expérience on le relève d'abord verticalement, et l'on donne quelques légères secousses pour faire tomber les index : celui de fer vient reposer sur le sommet de la colonne de mercure, et celui d'émail sur le sommet de la colonne d'alcool ; le premier reste toujours au dehors du liquide, le second, toujours au dedans : cela fait, on lui donne la position horizontale, qui est la seule dans laquelle il puisse donner des indications sûres.

215. *Thermomètre à maximum de Bellani.* — Il se compose d'un réservoir d'alcool, d'une colonne recourbée de mercure, et de deux cylindres de fer enveloppés de verre, qui servent d'index (*Fig.* 179 *et* 180) ; l'alcool remplit tout le réservoir a et une partie du tube jusqu'en *m* ; la colonne de mercure descend jusqu'à la courbure inférieure *i*, et se relève jusqu'en *m'* ; au dessus de *m'* se trouve une autre colonne d'alcool, qui remplit en partie le petit réservoir *r* ; un des index est représenté de grandeur naturelle dans la *figure* 180 ; la petite enveloppe du cylindre de fer est aplatie à l'extrémité *p*, par laquelle elle repose sur le mercure, et un cheveu *bc* forme une boucle élastique, qui presse les parois du tube, et qui est capable de retenir l'index, quand il est simplement flottant dans la colonne d'alcool ; mais quand l'index est poussé par le mercure, l'élasticité du cheveu ne l'empêche pas de marcher, et c'est ainsi qu'il marche ou qu'il reste en repos, suivant

que le mercure le pousse ou l'abandonne. Lorsqu'on veut mettre l'appareil en expérience, on fait descendre les index sur le mercure, au moyen d'un aimant. On voit dans la *figure* 179 que l'index *b* est destiné à marquer les plus basses températures ou les minimum, et l'index *h* les hautes températures ou les maximum.

216. *Thermomètre à maximum de Six.* — C'est à Six que nous devons la première invention du thermomètre précédent; Bellani lui a seulement fait subir quelques changemens; il l'a réduit à deux branches, au lieu de trois, en agrandissant le réservoir R; il a enveloppé les cylindres de fer, et il a mis le cheveu en boucle, au lieu de le mettre droit, comme faisait Six.

217. *Thermomètres métalliques.* — On a essayé une foule de combinaisons et de dispositions différentes, pour employer les divers métaux à la construction des thermomètres; mais de tous les thermomètres métalliques qui reposent sur la dilatation d'un seul métal, l'usage n'en a conservé aucun qui mérite une description particulière. Il n'en est pas de même des thermomètres qui reposent sur l'inégale dilatation de deux ou de plusieurs métaux; ils peuvent offrir de grands avantages, soit dans les observations ordinaires, soit dans des recherches délicates, et nous pensons qu'il est nécessaire de faire connaître au moins les deux suivans.

218. *Themomètre à cadran.* — La *figure* 207 représente une des dispositions que l'on donne habituellement aux thermomètres de cette espèce. *fgh* est une lame à peu près semblable aux lames de compensation (183); elle se compose d'une petite bande de cuivre et d'une petite bande d'acier, clouées ou soudées ensemble dans toute leur longueur. Cette lame binaire est fixée en *f*; elle se recourbe en *g*, et elle se termine en *h*. Autour de l'axe *b* tourne un levier, dont le petit bras est sans cesse appuyé contre l'extrémité *h*, et dont le grand bras porte des dents *dd'*.

Les mouvemens très-petits que la dilatation peut produire à l'extrémité *h* sont déjà amplifiés dans le même rapport que les bras de levier; ensuite les dents *dd'* engrènent dans un petit pignon, qui tourne autour de l'axe central *c*, et l'aiguille *li*, tournant autour du même axe, amplifie encore les mouvemens du pignon. On calcule les dimensions pour que les 100° du thermomètre de centigrade correspondent à peu près à une révolution entière de l'aiguille. Les instrumens de cette espèce doivent être gradués sur le thermomètre à mercure, de degré en degré, ou au moins de 10° en 10°.

219. *Thermomètre de Breguet.* — Cet instrument est le plus délicat et le plus commode de tous les thermomètres métalliques; il se compose d'un petit ruban de métal, de 1 à 2 millimètres de largeur, qui est roulé en spire, comme le représente la *figure* 177; la spire est attachée par son sommet à une pièce de cuivre, qui la laisse parfaitement libre et isolée, et, à son extrémité inférieure, elle porte une aiguille horizontale très-légère, dont la pointe parcourt la circonférence du cercle divisé *cc'*; le cercle est évidé, et repose sur trois pieds très-minces, afin que l'air puisse circuler aisément entre tous les tours de la spire. Une cloche recouvre l'appareil, pour le garantir de l'agitation extérieure.

Le ruban de la spire est composé de trois couches métalliques superposées, argent, or et platine; la couche d'or, qui est au milieu, sert à souder les deux autres; ce système a d'abord une épaisseur sensible; mais on le lamine jusqu'à le réduire à une épaisseur totale de $\frac{1}{50}$ de millimètre; on peut juger par là de la masse excessivement petite de l'instrument, et par conséquent de la rapidité avec laquelle il prend la température de l'air qui le touche.

Par l'inégale dilatation du platine et de l'argent, la spire se tord ou se détord, quand la température s'élève

on s'abaisse, et l'aiguille marche pour obéir à ces mouvemens. On gradue cet instrument en comparant sa marche à celle d'un thermomètre à mercure très-sensible.

220. *Pyromètres métalliques.* — On nomme pyromètres les instrumens qui sont destinés à mesurer les *hautes températures*, et en général on appelle hautes températures celles qui sont supérieures au point d'ébullition du mercure. On a fait des essais sans nombre pour construire des pyromètres avec les métaux; mais tous ces instrumens ont deux grands inconvéniens: d'abord ils ne reviennent pas exactement au même point pour le même degré de chaleur, parce que les pièces se tourmentent au feu, et ensuite il n'y a aucun rapport certain entre leurs indications et les indications du thermomètre centigrade.

Cependant il peuvent être utiles dans les applications des arts, où l'on ne cherche pas à obtenir des évaluations numériques de températures, mais seulement à produire des degrés de chaleur déterminés, tantôt plus forts ou plus faibles, suivant les effets que l'on veut obtenir. Le pyromètre qui paraît le plus commode pour cet usage est représenté *figure* 178; il se compose d'une plaque ou d'un tourteau d'argile, sillonné dans sa longueur par une rainure un peu profonde, et d'une règle de fer ou de platine, placée de champ dans la rainure; la règle s'appuie d'une part contre un talon fixe, et de l'autre elle presse le petit bras d'un levier coudé dont le grand bras fait l'office d'aiguille et parcourt un arc divisé. Le talon fixe et l'axe de rotation du levier étant portés l'un et l'autre par le tourteau d'argile, qui se dilate moins que le métal, on voit que l'aiguille doit prendre diverses positions, suivant les divers degrés de chaleur; mais lorsqu'on essaie d'évaluer les résultats en degrés centigrades, les nombres que l'on donne sont tout-à-fait illusoires, et n'ont sans doute aucun rapport avec la vérité.

221. *Pyromètre de Wedgewood.* — Cet instrument

repose sur une propriété chimique très-remarquable, dont jouissent à divers degrés les argiles de différentes espèces. L'argile ayant été pulvérisée, malaxée et séchée dans une étuve, à la température de 100°, si on l'expose ensuite à de hautes températures, on observe qu'elle se retire sur elle-même, et diminue de volume à mesure que la température s'élève. Cette *retraite*, ou, comme on dit aujourd'hui, ce *retrait* n'est pas une propriété passagère; l'argile qui l'a éprouvé n'est plus susceptible de revenir à son état ni à ses dimensions primitives, et plus la température s'élève, plus le retrait est considérable. Supposons donc que l'on ait un grand nombre de petits cylindres, qui soient tous de la même espèce d'argile, tous préparés de la même manière, et tous exactement de la même grandeur et de la même forme; il est évident que, si l'on en prend plusieurs, qu'on les expose chacun à une température particulière, il suffira de les mesurer ensuite pour connaître celles de ces températures qui sont les plus hautes et celles qui sont les plus basses; car les températures seront d'autant plus hautes que le retrait sera plus considérable. C'est sur ce principe qu'est fondé le pyromètre de Wedgewood. Pour mesurer commodément les cylindres d'argile qui ont éprouvé le retrait, on les fait passer dans une rainure formée par deux règles de cuivre ou de laiton, légèrement inclinées l'une à l'autre (*Fig.* 181). Les deux règles et la plaque sur laquelle elles sont fixées s'appellent la *jauge*; on leur donne 609^{mm} de longueur, et l'on a coutume de les couper en deux parties repliées l'une sur l'autre, pour rendre l'appareil plus portatif. Sur la longueur totale on fait 240 divisions, que l'on appelle *degrés du thermomètre de Wedgewood*. Au sortir de l'étuve à 100°, chaque petit cylindre est juste de grandeur pour se tenir à l'entrée de la rainure.

Les figures 182 et 183 représentent la coupe et le plan d'un petit étui d'argile dans lequel on fait ordinairement chauffer les petits cylindres.

Pour graduer l'instrument et comparer ses indications à celles du thermomètre centigrade, il faudrait d'avance connaître la température qui est nécessaire pour réduire les petits cylindres au point de les faire aboutir aux divisions successives. Mais jusqu'à présent on ne connaît aucun moyen d'arriver à ces résultats. C'est par des hypothèses tout-à-fait gratuites que l'on établit ces rapports, et lorsqu'on dit que 1° du pyromètre de Wedgewood vaut 72° centigrades, on exprime une convention plutôt qu'une vérité.

FIN DE LA PEMIÈRE PARTIE.

DEUXIÈME PARTIE.

Changemens d'état des Corps.

CHAPITRE PREMIER.

De la Fusion et de la Solidification.

222. *Fusion.* — Il est facile de reconnaître que la *fusion* ou le passage de l'état solide à l'état liquide est un phénomène produit par la chaleur, et qu'aucune autre cause dans la nature ne peut déterminer les corps à ce changement d'état : la glace peut être brisée ou réduite en poussière, elle peut être soumise à toutes les puissances mécaniques et à tous les agens naturels, sans cesser d'être un corps solide, à moins que la chaleur ne vienne exercer sur elle son action pour la convertir en eau. Il en est de même de la cire, et lorsqu'on la voit fondre aux rayons du soleil, on sait bien que c'est par l'effet de la chaleur qu'elle entre en fusion, et non par l'effet de la lumière ; et si le plomb peut se liquéfier et devenir coulant, lorsqu'on le bat sur une enclume à coups redoublés, c'est que la compression et la percussion dégagent de la chaleur tout-à-fait semblable à la chaleur d'un foyer. Ainsi, l'état de solidité ou de fluidité d'un corps est un état relatif, dépendant uniquement de la température à laquelle ce corps est soumis. A une autre distance du soleil, la terre prendrait une autre consistance

et un autre aspect : si elle en était plus voisine, les métaux seraient pour la plupart dans un état habituel de fusion, et les profondeurs de la mer, au lieu d'être remplies d'eau, pourraient bien être remplies de substances métalliques liquéfiées ; au contraire, si elle en était plus éloignée, la mer serait une masse solide, il n'y aurait plus d'eau coulante et probablement plus de liquide en circulation pour produire les phénomènes organiques de la végétation et de la vie.

La chaleur pénétrant et dilatant tous les corps, il est curieux de chercher si elle peut pareillement les faire passer tous sans exception de l'état solide à l'état liquide. Or, en examinant sous ce point de vue tous les corps solides, on trouve entre eux de grandes différences : il y en a qui sont très-*fusibles* et qui ne peuvent soutenir des températures même très-basses sans passer à l'état liquide; tels sont la glace, le phosphore, le soufre, la cire, les corps gras et les résines ; il y en a d'autres qui exigent, pour se fondre, des températures un peu plus élevées, comme l'étain, le plomb et divers alliages; enfin il y en a qui ne peuvent entrer en fusion que par des feux long-temps soutenus et aux plus hautes températures que nous soyons capables de produire; l'or, l'acier, le fer et le platine sont dans ce cas. Les corps qui résistent à ces plus hauts degrés de chaleur sont appelés *infusibles*, *fixes* ou *réfractaires;* et comme nos moyens de développer de la chaleur se perfectionnent de jour en jour, le nombre des substances infusibles a été sans cesse en diminuant. Le charbon paraît être le plus réfractaire de tous les corps : cependant plusieurs physiciens prétendent avoir observé quelques traces de fusion sur les arêtes des diamans qu'ils soumettaient à l'essai. En attendant que ce résultat soit constaté, on peut du moins conclure par analogie qu'il n'y a pas de corps essentiellement infusibles.

Les substances organiques, étant en général composées de

carbone et d'élémens gazeux plus ou moins volatils, se décomposent souvent par l'action du feu plutôt que de se liquéfier. Le bois, fortement chauffé, se carbonise et ne se fond pas; il en est de même des fruits, des fleurs et des autres tissus végétaux; il en est de même encore des fibres musculaires et de tous les autres tissus des corps vivans. Toutes ces substances organiques se décomposent par la chaleur; les produits volatils s'exhalent, et il ne reste en dernier résultat que le charbon et les autres élémens fixes qui leur servent de bases.

Plusieurs corps inorganiques se décomposent aussi avant de se fondre, et il a fallu l'esprit inventif de Hall pour démontrer leur fusibilité. Son procédé consiste à chauffer ces corps en les maintenant sous une haute pression, de telle sorte que les élémens les plus volatils ne puissent pas s'exhaler. C'est ainsi que Hall a fait fondre du marbre, sans qu'il se convertît en chaux, et qu'il a démontré pareillement la fusibilité d'un grand nombre de substances volcaniques. Ces résultats sont importans pour discuter l'origine et la formation des diverses couches dont se compose la terre.

223. *Conditions de la fusion.* — Lorsque les corps passent de l'état solide à l'état liquide, ils présentent deux phénomènes singuliers (144 et 145); premièrement, ils restent solides jusqu'à ce qu'ils soient arrivés à une certaine température *fixe*, qui est toujours la même pour le même corps, et c'est alors seulement que la fusion peut commencer; secondement, ils restent à la même température pendant toute la durée de la fusion, quelle que soit la quantité de calorique qu'on leur fournisse; d'où il suit qu'ils absorbent ce calorique pour se fondre, et qu'ils le cachent dans leur intérieur, sans en laisser rien paraître au dehors. Ainsi, *la fixité de température*, et *l'absorption du calorique latent* sont les *deux conditions* essentielles de la fusion. Ces phénomènes peuvent être facilement constatés sur les corps

très-fusibles, dont la température est accessible au thermomètre à mercure, et ils peuvent l'être encore sur les substances peu fusibles, dont on obtient des masses liquides assez considérables pour y plonger quelques-uns des pyromètres dont nous avons parlé. Il y avait près de cent ans que le thermomètre était inventé, que l'on ne connaissait pas encore, d'une manière certaine, l'invariabilité du point de fusion des corps; on croyait que la glace, par exemple, devait entrer en fusion à diverses températures, suivant la latitude ou l'élévation des lieux où elle était formée. La première condition de la fusion une fois démontrée, il fallut encore plus d'un demi-siècle pour constater l'autre, c'est-à-dire l'absorption du calorique latent; car ce fut en 1763 que Black mit cette vérité fondamentale dans tout son jour, et qu'il en fit voir les importantes conséquences. Il est visible que la quantité de calorique latent que prend un corps pour se fondre est proportionnelle à la masse de ce corps qui entre en fusion, et nous verrons plus loin qu'à masse égale, des corps différens prennent des quantités de calorique latent très-différentes; ce qui suffit pour imprimer à chaque substance un caractère distinctif pareil à celui qui dérive de la densité ou des autres qualités primitives de la matière.

L'affinité chimique est cependant une cause qui peut faire changer le point de fusion des corps, mais il ne paraît pas qu'elle puisse modifier en rien l'absorption du calorique latent : ainsi, la neige ou la glace pilée étant, par exemple, à la température de — 10° et en contact avec du sel ordinaire aussi à — 10°, la fusion s'opère par la combinaison de ces deux corps, et la température s'abaisse de plus en plus; ce qui est une preuve évidente de l'absorption du calorique latent. C'est là le principe de la formation des *mélanges frigorifiques* dont nous nous occuperons plus tard. Dans les combinaisons de cette espèce, la limite du froid que l'on peut produire est déterminée par la température à

laquelle les élémens de la combinaison cessent d'agir l'un sur l'autre. La neige et le sel, par exemple, n'ayant plus d'action sensible à 18 ou 20° au dessous de 0, il est impossible d'obtenir avec ces élémens un froid plus grand que —18 ou—20°, puisqu'au delà de ce terme ils cessent de se combiner; et pour approcher de cette limite autant qu'il est possible, il faut que le calorique latent soit exclusivement fourni par la portion des élémens qui entrent en combinaison.

Ce qui arrive dans les mélanges frigorifiques se reproduit avec quelques modifications dans plusieurs procédés des arts, comme dans l'extraction des métaux, dans la fabrication du verre, et aussi dans les nombreux essais que l'on peut faire au chalumeau, pour la détermination chimique ou minéralogique de diverses substances. On emploie alors ce qu'on appelle *fondans*, c'est-à-dire des corps qui ont la propriété d'accélérer la fusion des matières avec lesquelles ils sont en contact, à peu près comme le sel accélère la fusion de la glace ou de la neige. Le composé qui en résulte étant beaucoup plus fusible que n'est la substance à laquelle on ajoute le fondant, on peut en tirer parti plus facilement : tantôt on le destine à d'autres combinaisons chimiques, comme il arrive à la mine de fer, qui entre en fusion par le fondant et ensuite se désoxide et se carbonise pour se transformer en fonte; tantôt on le travaille immédiatement, comme le verre tantôt; on observe les nuances de sa couleur pour juger par là des élémens chimiques qui le constituent. M. Dobereiner a démontré, par exemple, qu'en mêlant 207 grammes de plomb, 118 d'étain, 284 de bismuth et 1617 de mercure, à la température de 17° le thermomètre descend de suite à—10°.

Un grand nombre de physiciens ont pris soin de déterminer les points de fusion des différens corps, et nous avons rassemblé, dans le tableau suivant, ceux de ces points de fusion qui sont les mieux constatés et qui paraissent être

d'un usage plus fréquent. Nous avons déjà prévenu qu'il est impossible d'évaluer avec quelque confiance les degrés du pyromètre de Wedgewood en degrés centigrades.

Table des points de fusion de différentes substances, en degrés du pyromètre de Wedgewood et en degrés du thermomètre centigrade.

NOMS DES SUBSTANCES.	Degrés du pyrom.	Degrés centésimaux.	NOMS DES SUBSTANCES.	Degrés du pyrom.	Degrés centésimaux.
Tungstène.	170	»	Alliage, 1 atome d'étain, 1 bismuth. .	»	141,2
Chrôme.	170	»	— 1 plomb, 4 étain, 5 bismuth. . . .	»	118,9
Molybdène.	170	»	Soufre.	»	109
Colombium.	170	»	Iode.	»	107
Manganèse.	160	»	2 plomb, 3 étain, 5 bismuth.	»	100
Nickel.	160	»	5 plomb, 3 étain, 8 bismuth.	»	100
Fer.	130	»	4 bismuth, 1 plomb, 1 étain.	»	94
Acier.	130	»	Sodium.	»	90
Cobalt.	130	»	Potassium.	»	58
Or.	32	»	Phosphore.	»	43
Cuivre.	27	»	Acide stéarique. . .	»	70
Argent.	»	538	Cire blanchie. . . .	»	68
Antimoine.	»	432	Cire non blanchie. .	»	61
Zinc.	»	360	Acide margarique. .	»	55 à 60
Plomb.	»	334	Stéarine.	»	49 à 43
Bismuth.	»	256	Spermaceti.	»	49
Étain.	»	230	Acide acétique. . . .	»	45
Alliage, 5 atomes d'étain, 1 de plomb.	»	194	Suif.	»	33,33
— 4 étain, 1 plomb.	»	189	Glace.	»	0,0
— 3 étain, 1 plomb	»	186	Huile de térébenth. .	»	— 10
— 2 étain, 1 plomb.	»	196	Mercure.	»	— 39,0
— 1 étain, 1 plomb.	»	241			
— 1 étain, 3 plomb.	»	289			
— 8 étain, 1 bismuth.	»	200			
— 2 étain, 1 bismuth.	»	167,7			
— 3 étain, 1 plomb.	»	167,7			

224. *Solidification.* — Quand les liquides passent à l'état solide, on observe en général deux conditions correspondantes à celles de la fusion : premièrement la solidification

s'opère à une température fixe, qui est celle de la fusion; secondement, tout le calorique latent, qui a été absorbé pendant la fusion, est reproduit et dégagé pendant la solidification. Il suffit d'un thermomètre ou d'un pyromètre pour démontrer la première de ces vérités; quant à la deuxième, nous ne pourrons indiquer comment on la constate par l'expérience que quand nous donnerons les moyens de mesurer les quantités de calorique latent. On sait cependant, et cette observation a été faite en 1724 par Fahrenheit, on sait que, dans certaines circonstances, l'eau pure peut être amenée jusqu'à 10 ou 12° au dessous de zéro, sans se congeler; c'est une sorte d'exception qui se présente dans quelques autres liquides et surtout dans les corps gras. Ce phénomène, qui a lieu quelquefois à l'air libre, se manifeste plus sûrement quand la surface du liquide ne supporte plus qu'une faible pression, produite par de l'air ou de la vapeur; aussi, pour l'observer, il convient d'enfermer le liquide dans des tubes que l'on scelle après y avoir fait le vide, ou de le placer sous le récipient de la machine pneumatique et ensuite de refroidir graduellement, en évitant, autant qu'il est possible, toute espèce d'agitation. Alors, après un certain degré de refroidissement, il suffit d'imprimer au liquide quelque secousse légère, ou de jeter dans sa masse quelques fragmens d'un corps solide quelconque, pour déterminer à l'instant une solidification plus ou moins complète. En même temps, le thermomètre, qui indiquait l'abaissement de température, s'élève subitement et remonte quelquefois jusqu'au terme naturel du changement d'état du corps. La rapidité de la solidification qui a eu lieu dans ces circonstances, et l'ascension du thermomètre, sont deux phénomènes faciles à expliquer : le calorique latent des premières parties qui se congèlent se porte sur les parties voisines, qui sont encore liquides; il les réchauffe, mais ne les réchauffe pas assez pour les empêcher de se congeler à leur tour; de là le double effet de la prompte solidification

et du réchauffement. Les dissolutions de sulfate de soude présentent des phénomènes analogues : les dissolutions saturés à chaud laissent peu à peu déposer le sel de soude, lorsqu'elle se refroidissent à l'air libre; mais si on les enferme dans des tubes effilés que l'on scelle à la lampe, après les avoir purgés d'air par l'ébullition, le refroidissement ne donne plus de précipité, et dès que l'on brise la pointe effilée pour laisser entrer l'air, il y a précipité presque subit et élévation de température.

Quand le retour à l'état solide se fait au degré de chaleur ordinaire, il se fait toujours lentement et sans aucune élévation de température. Par exemple, quand l'eau gèle à 0, la congélation commence en général sur plusieurs points à la fois, et sur tous ces points, les premières molécules qui se gèlent donnent leur calorique latent aux molécules voisines, qui sont par là maintenues à l'état liquide pendant quelques instans de plus. C'est pourquoi on aperçoit d'abord des lames minces de glaces, ou des aiguilles très-fines, ou des filamens qui se croisent de mille manières dans la masse du liquide. A une certaine distance de ces premiers filamens, il s'en forme d'autres, et ainsi de suite jusqu'à ce que la chaleur latente se soit peu à peu dissipée et que le froid ait pu saisir successivement toutes les molécules liquides pour les réunir en une seule masse solide. Sans le calorique latent, la solidification des corps se ferait en un instant; ainsi la rapidité de la solidification dépend de l'abondance de la chaleur qui se dégage, et de la facilité avec laquelle elle peut se dissiper.

225. Une même substance liquide peut prendre, en se solidifiant, des aspects et des propriétés très-différentes. Quand le phénomène se produit lentement et sans trouble, il arrive ordinairement que la substance cristallise et qu'elle prend la plus grande densité dont elle soit susceptible. Au contraire, quand le refroidissement est prompt ou quand la masse liquide est agitée de quelque manière, les molé-

cules n'ont pas le temps de se grouper et de s'arranger, elles se précipitent brusquement et forment un solide dont toutes les parties intérieures sont dans un état plus ou moins forcé. Nous verrons, en parlant des *Actions moléculaires*, les phénomènes singuliers que présentent, sous ce point de vue, le soufre, le phosphore, le verre et plusieurs autres corps, lorsqu'ils sont subitement refroidis, à partir d'une température un peu haute, et surtout lorsqu'ils sont forcés à une brusque solidification. Cependant, que la solidification soit lente ou rapide, la plupart des corps diminuent de volume à l'instant de ce passage; tout le monde sait que l'eau éprouve un état contraire, qu'elle augmente de volume en se congelant, et M. Erman a observé un phénomène analogue dans l'alliage de 4 parties de bismuth, 1 de plomb et 1 d'étain; il se dilate en se congelant, et il a un maximum de densité à l'état solide, vers 44°.

CHAPITRE II.

Des Vapeurs dans le vide.

226. *Les vapeurs se forment lentement dans l'air et instantanément dans le vide.* — Lorsqu'un liquide est exposé au contact de l'air, il arrive ordinairement qu'il diminue peu à peu et qu'après un temps plus ou moins long il disparaît tout-à-fait. Ainsi, l'eau qui couvre la terre après les pluies ne résiste pas au souffle d'un vent sec ou à l'action prolongée du soleil; elle se dissipe en quelques jours, et ce n'est pas seulement parce qu'elle s'infiltre dans le sol, mais aussi parce qu'elle s'exhale dans les airs. Au reste, on en voit la preuve dans ce qui arrive à un vase plein d'eau, exposé à l'air libre ou même dans un appartement; l'eau décroît d'instant en instant, et enfin il ne reste au fond du vase que les corps étrangers qu'elle tenait en dissolution. Le même phénomène se produit avec une rapidité encore plus grande lorsqu'on fait bouillir un liquide par l'action du feu; le liquide n'est absorbé ni par le vase ni par le feu, et cependant il disparaît en quelques heures. De ces diverses observations l'on peut conclure que les liquides changent d'état, qu'ils deviennent invisibles et prennent une force expansive comme les gaz; c'est ce que l'on exprime en disant qu'ils se *vaporisent* ou se réduisent en *vapeurs*. Les corps sont d'autant plus *volatils* qu'ils se vaporisent ou qu'ils se volatilisent plus promptement et à des températures moins élevées.

On peut remarquer aussi que, dans certains cas, ce n'est pas le liquide tout entier qui passe à l'état de vapeur. Cela

arrive lorsqu'il est un mélange de plusieurs corps différens qui se peuvent séparer par l'*évaporation;* alors les parties plus volatiles s'exhalent en plus grande abondance, et ce qui reste n'est plus composé des mêmes élemens ou du moins il n'en est plus composé dans les mêmes proportions.

Pendant long-temps on a supposé que les vapeurs ne pouvaient ni se former ni subsister par elles-mêmes, mais qu'elles prenaient naissance à la surface des liquides par l'action dissolvante de l'air, et que cette même cause était encore nécessaire pour les maintenir suspendues dans l'atmosphère. Pour montrer la fausseté de cette opinion et en même temps pour étudier les propriétés remarquables des vapeurs, le moyen le plus simple consiste à leur offrir un espace vide d'air et de gaz, dans lequel elles puissent se développer librement par elles-mêmes. Le vide barométrique est éminemment propre à ce genre d'expériences; non-seulement parce qu'il est aussi parfait qu'il soit possible, mais aussi parce que, la colonne de mercure étant mobile, elle peut indiquer, par sa dépression, l'énergie de la force expansive qui s'exerce sur son sommet.

Supposons donc que, dans une large cuvette cc' (*Fig.* 197), on dispose deux baromètres B et B', qui donnent très-exactement la pression de l'atmosphère, et qu'ensuite, au moyen d'une pipette recourbée, on fasse passer une petite quantité d'eau dans le tube du baromètre B'. L'eau s'élève, en vertu de sa légèreté spécifique, elle arrive bientôt dans le vide de Toricelli, et, à l'instant, on voit le sommet de la colonne qui descend de plusieurs millimètres. Ce n'est pas le poids de la petite colonne d'eau supérieure qui a pu déprimer le mercure, ce n'est pas non plus l'air qu'elle aurait pu contenir et qui se serait dégagé; car nous la supposons parfaitement purgée d'air. Il faut donc que la substance propre de l'eau se soit vaporisée dans le vide, et que sa vapeur ait une propriété pareille à celle que nous avons appelée la *force expansive*, la

force élastique ou la *tension des gaz*; car elle agit comme ferait une petite quantité d'air que l'on aurait fait passer au dessus du mercure.

La mesure de cette force élastique est donnée par la *dépression*, c'est-à-dire par l'abaissement du sommet *t* au dessous du sommet *c*, ou en général par la différence de hauteur entre le vrai baromètre B et le baromètre à vapeur B′; en effet, si le sommet *t* est déprimé, par exemple, de quinze millimètres au dessous du sommet *c*, c'est qu'il s'est développé dans le vide au dessus de *t* une force élastique qui fait équilibre à cette colonne de mercure de quinze millimètres.

Un troisième baromètre B″, que l'on mettrait à côté des deux premiers et dans lequel on ferait passer un autre liquide, de l'éther sulfurique par exemple, éprouverait aussi une dépression instantanée, et une dépression beaucoup plus grande que celle du baromètre B′; car, en faisant l'expérience à la température ordinaire, le sommet tomberait à peu près à la moitié de la hauteur du baromètre B. D'où il résulte que, dans ces circonstances, la force élastique de la vapeur d'éther sulfurique est à peu près une demi-pression atmosphérique.

M. Gay-Lussac a fait construire un appareil qui est très-commode pour montrer au même instant les différentes forces élastiques des différentes substances et pour en donner la mesure. La *figure* 200 en représente une coupe verticale. *aa′* est un axe en bois ou en fer, qui peut tourner sur lui-même en s'appuyant en *a*, au fond d'une large cuvette *cc′*, et en *a′*, à l'extrémité du support PP; *d* et *d′* sont deux disques solides, fixés perpendiculairement à l'axe et portant de petites ouvertures correspondantes, dans lesquelles on fait tenir des tubes barométriques; *rr′* est une règle divisée qui peut monter ou descendre, et dont l'extrémité inférieure est terminée en pointe, afin qu'au moment de l'expérience on puisse l'amener plus sûrement

à affleurer le niveau du mercure; *v* est un vernier qui parcourt toute la longueur de la règle et au moyen duquel on estime les vingtièmes de millimètre. Dans l'un des baromètres, le vide est au dessus de la colonne, dans les autres on fait passer des corps différens, de l'eau, de l'alcool, des éthers, du camphre, du musc, etc.; et l'on reconnaît ainsi que les vapeurs de tous ces corps se forment instantanément dans le vide, et qu'elles y prennent des forces élastiques différentes. Pour en avoir la mesure exacte, il suffit de faire tourner l'appareil et d'amener vis-à-vis la règle divisée le tube dont on veut connaître la dépression.

227. *Du maximum de tension des vapeurs.* — Il est évident que la force expansive des vapeurs s'exerce, dans tous les sens, comme la force expansive des gaz; il est évident aussi qu'elle s'exerce indéfiniment, c'est-à-dire qu'une quantité de vapeur, quelque petite qu'elle soit, se répand de toutes parts dans un espace vide, quelque grand qu'il puisse être, et qu'elle va s'arrêter aux parois qui limitent cet espace en y exerçant une pression plus ou moins forte. Ainsi la moindre parcelle d'eau devient capable, en se vaporisant, de prendre un volume de plusieurs milliers de mètres cubes, comme ferait la moindre parcelle d'air en se répandant dans cet espace. Mais si les vapeurs ont une force expansive indéfinie, par laquelle elles peuvent prendre des volumes indéfiniment grands, elles n'ont pas une force élastique indéfiniment croissante, par laquelle elles puissent résister aux pressions qu'on exerce sur elles, et se réduire à prendre des volumes de plus en plus petits: nous allons voir en effet que, de la vapeur étant donnée, si on essaie de la comprimer, pour augmenter sa force élastique, on arrive à un point où cette vapeur se *condense* et repasse à l'état liquide plutôt que de prendre une force élastique plus grande; c'est *cette limite de résistance à être liquéfiée* que l'on appelle *la tension*

maximum de la vapeur. Cette vérité fondamentale peut être démontrée facilement, au moyen du baromètre à cuvette profonde, et qui est représenté *figure* 196; son tube T est très long et sa cuvette *cc'* a plusieurs pieds de profondeur. Après avoir fait bouillir, dans toute sa longueur, le tube plein de mercure, on achève de le remplir avec une colonne d'éther de deux ou trois centimètres d'épaisseur, et ensuite on le retourne verticalement pour le plonger dans la cuvette. L'éther gagne la partie supérieure du tube, une partie reste à l'état liquide et l'autre se vaporise dans le vide, de manière à produire une dépression considérable. La colonne *ns* aura, par exemple, 400 millimètres de hauteur, au lieu de 760 qu'elle prendrait, s'il n'y avait pas de vapeur. Cela fait, on enfonce le tube dans la cuvette, pour essayer de réduire à un moindre volume la vapeur qui s'est formée, et on observe alors deux phénomènes remarquables : premièrement, la colonne de mercure *sn* conserve exactement la même hauteur, ce qui prouve que la force élastique de la vapeur reste la même; secondement, la couche d'éther liquide augmente sensiblement d'épaisseur, à mesure que l'on enfonce, ce qui prouve que la vapeur se condense plutôt que de se laisser comprimer dans un moindre espace. Enfin, si l'on enfonce le tube au point de réduire de plus en plus la chambre barométrique, toute la vapeur disparaît et repasse à l'état liquide, sans que le sommet *s* ait éprouvé le moindre abaissement. Donc la vapeur d'éther a un maximum de force élastique. On peut même remarquer que c'est d'elle même qu'elle prend ce maximum, sans qu'il soit besoin de la comprimer pour la forcer à l'atteindre; et il en est toujours ainsi tant qu'elle est en contact avec le liquide qui lui donne naissance; car, en soulevant le tube pour agrandir la chambre barométrique, on observe encore que la colonne de mercure conserve la même hauteur *sn*, tandis que la couche liquide diminue de plus en plus. Ce qui est

une preuve visible que la vapeur se forme pour remplir le nouvel espace qui lui est offert et pour arriver toujours au maximum de tension. Mais si le tube peut être assez soulevé pour que le liquide disparaisse complètement, alors le sommet *s* de la colonne de mercure commence à s'élever, la dépression devient moindre, et, par conséquent, la force élastique de la vapeur cesse d'être à son maximum.

On peut même démontrer qu'à partir de cet instant les tensions sont en raison inverse des volumes, et qu'insi les vapeurs se compriment comme les gaz, en suivant la loi de Mariotte, aussi long-temps du moins qu'elles ne sont pas pressées au point de se condenser. Les autres liquides, soumis aux mêmes épreuves, se comportent comme l'éther; seulement leurs tensions maximum sont très-différentes.

228. *Equilibre de tension dans un espace inégalement chaud.* — Il est facile de reconnaître que la température a une grande influence sur la tension maximum des vapeurs; car en faisant les expériences précédentes à différens degrés de chaleur, la colonne barométrique éprouve des dépressions très-inégales. Par exemple, avec l'éther sulfurique, la dépression est à peu près de 180 millimètres à 0 de température, tandis qu'elle est de 630 à la température de 30°. Les phénomènes qui se produisent sous nos yeux nous fournissent d'ailleurs des preuves nombreuses de cette vérité : la vapeur d'eau n'a qu'une faible tension lorsqu'elle se forme à la surface des lacs ou à la surface de la mer; elle a une tension plus forte lorsqu'elle se forme par ébullition, puisqu'elle supporte alors la pression de l'atmosphère; enfin, à de hautes températures, cette tension devient si puissante qu'elle peut non-seulement lancer des projectiles du plus gros calibre, mais encore lancer au loin des machines entières et des masses énormes du poids de plusieurs quintaux; les explosions des machines à vapeur en offrent de trop nombreux et de trop terribles exemples. D'après cela, on peut se demander

quelle serait la tension maximum de la vapeur, dans un espace de forme quelconque, dont les diverses parties seraient à des températures différentes. En supposant que cet espace n'ait pas une grande hauteur verticale et que la vapeur soit, comme il arrive toujours, d'une faible densité, il faut, par les conditions d'équilibre des fluides élastiques (72), que la tension soit la même dans tous les points où il y a de la vapeur ; et, comme dans les points les plus froids la tension maximum ne peut jamais être aussi grande que dans les points les plus chauds, il faut bien que, dans ces derniers, la tension cesse d'être au maximum et qu'elle diminue jusqu'à devenir égale à la tension maximum des points les plus froids. Ainsi, dans un espace inégalement chaud, quand l'équilibre est établi, la tension de la vapeur est la même dans tous les points, et partout elle est égale à la tension maximum des parties de cet espace qui sont à la température la plus basse. Ce principe est important pour toutes les recherches qui vont suivre et où nous essaierons de trouver les relations qui existent entre la force élastique des vapeurs et leur température.

229. *Mesure de la force élastique de la vapeur d'eau.* — On mesure la tension de la vapeur d'eau, entre 0 et 100°, au dessous de 0, et au dessus de 100° jusqu'aux plus hautes températures. Chacune de ces déterminations exige un appareil différent.

Entre 0 et 100°. — L'appareil se compose de deux tubes barométriques placés très-près l'un de l'autre et plongeant dans la même cuvette. Le premier de ces tubes est un baromètre parfait ; le deuxième est un baromètre à vapeur, c'est-à-dire un baromètre au dessus duquel on a fait passer une petite colonne d'eau qui s'est en partie vaporisée dans le vide. Ces deux tubes sont enveloppés d'un *manchon* de verre, ou plutôt d'un autre tube qui plonge aussi dans la cuvette, et qui a 3 ou 4 pouces de largeur, et plus de

30 pouces de hauteur. On met de l'eau dans le manchon jusqu'à ce qu'elle dépasse les sommets des deux tubes barométriques, et ensuite on la refroidit et on la réchauffe graduellement, pour qu'elle parcoure tous les degrés depuis 0 jusqu'à 100°. Des thermomètres, placés à diverses hauteurs, indiquent à chaque instant sa température, et il est évident que cette température est aussi celle du baromètre parfait, celle du baromètre à vapeur, et celle de la vapeur elle-même, qui se forme à son sommet. Pour avoir la force élastique de cette vapeur correspondante à chaque degré, il suffit d'observer la dépression du baromètre à vapeur, par rapport au baromètre parfait, et l'on y parvient aisément au moyen d'une règle verticale qui est au dehors du manchon et sur laquelle se meuvent deux lunettes horizontales, dont l'une se dirige au sommet du baromètre parfait, et l'autre au sommet du baromètre à vapeur. L'intervalle des deux lunettes est la mesure de la dépression; il suffit seulement d'y faire une correction de température pour la ramener à 0, car la colonne de mercure qui exprime la tension des vapeurs doit toujours être réduite à 0, comme celle qui exprime la hauteur du baromètre. Tel est le procédé très-simple qui fut imaginé par Dalton de Manchester, en 1805, pour étudier les vapeurs, et qui lui servit à établir enfin la vraie théorie de leur formation et de leur élasticité.

Au dessous de 0. — La glace elle-même se vaporise comme l'eau; plusieurs observations semblaient indiquer ce résultat, mais c'est à M. Gay-Lussac que nous devons un appareil propre à le constater d'une manière directe, et, de plus, à donner la mesure exacte de la tension des vapeurs qui se forment sur la glace à toutes les températures plus basses que 0. Cet appareil est représenté *figure* 199; il se compose de deux baromètres plongeant dans la même cuvette, et d'un support au dessus duquel est un matras tubulé *m*, rempli d'un mélange frigorifique, et d'un ther-

momètre t, qui en donne la température; l'un des baromètres contient une petite colonne d'eau, et sa partie vide se recourbe pour pénétrer dans le mélange du matras et en prendre la température. Ainsi, la chambre barométrique se compose d'une partie froide, dont la température est connue et d'une autre partie qui est à la température ambiante; donc, d'après le principe précédent (228), la tension maximum de la vapeur est celle qui convient à la température du mélange refrigérant. On voit même, par cette expérience, comment s'établit l'équilibre de tension; car on voit la petite colonne d'eau qui repose au sommet du mercure, diminuer de plus en plus et disparaître complètement; elle disparaît parce que la vapeur qu'elle donne ayant, au moment de sa formation, une force expansive plus grande que la vapeur qui est refroidie à l'extrémité du tube, elle n'a rien qui l'arrête, et elle va se condenser et se congeler à son tour dans l'espace froid. Quelquefois même la rapidité de l'évaporation est si grande que la petite colonne d'eau se trouve congelée sur le mercure, et ne disparaît alors qu'après un temps très-long. Auprès des baromètres on voit une règle verticale sur laquelle se meut une lunette horizontale, avec laquelle on observe la dépression.

Au dessus de 100°. — Pour montrer qu'au dessus de 100° la tension de la vapeur d'eau est plus grande qu'une pression atmosphérique, on peut employer un simple tube recourbé (*Fig.* 198), dont la courte branche est fermée en s; on le remplit de mercure jusqu'à la demi-hauteur de la branche ouverte, et on fait passer en s une petite colonne d'eau; ensuite on plonge l'appareil dans un bain d'huile dont la température est plus haute que 100°; bientôt la vapeur se forme, et sa force élastique est égale à une pression atmosphérique, plus la différence qui existe entre deux niveaux du mercure dans la branche ouverte et la branche fermée. Mais pour mesurer exactement les tensions qui s'élèvent à plusieurs atmosphères et les températures correspondantes,

on rencontre de très-grandes difficultés. La science ne possédait sur ce point que des données vagues et incertaines, lorsque MM. Arago et Dulong furent chargés par l'Académie des Sciences de déterminer les forces élastiques de la vapeur d'eau jusqu'aux plus hautes pressions dont on fasse usage dans les applications industrielles. Ce grand travail a été terminé en 1830; avant d'en rapporter les résultats, nous allons donner une idée des appareils qui ont servi à ces importantes déterminations.

Production de la vapeur. — La vapeur est produite dans une forte chaudière en tôle CC′, (*Fig.* 223, planche 10), contenant environ 80 litres. Dans sa portion cylindrique qui est la plus faible, elle a 13 millimètres d'épaisseur. La même figure représente le fourneau FF′, la grille G, et le tuyau T par lequel s'échappe la fumée.

Mesure des températures. Deux canons de fusil E et R, scellés au couvercle, ouverts en haut, fermés en bas et plein de mercure, servent à indiquer les températures de l'eau et de la vapeur. Dans le mercure qu'ils contiennent sont établis en permanence des thermomètres dont les tiges, recourbées horizontalement au sortir des canons, sont maintenues à une température constante au moyen d'un courant d'eau. Cette disposition se voit plus en grand dans la *figure* 224.

Mesure des tensions. — La vapeur formée au dessus de l'eau, à une température connue, s'élève par le petit tube vertical BB′ pour venir exercer sa pression en U, au sommet de la colonne d'eau qui remplit le tube incliné UDH, et toute la partie supérieure du vase manométrique VV′. Cette pression se transmet sur la surface SS′ du mercure, et enfin à l'air du manomètre MM′ qui est le même que nous avons décrit précédemment (*page* 170). Comme on connaît la pression correspondante à une position donnée du sommet de la colonne du mercure dans le manomètre, on en déduit la force élastique de la vapeur. Il y a seulement

deux corrections à faire, l'une relative à sa hauteur verticale de la colonne d'eau, depuis son sommet U jusqu'à sa base SS′, et l'autre relative à la hauteur variable du mercure dans le vase VV′. C'est pour faire ces corrections avec exactitude que l'on voit sur la seconde platine du vase VV′ un petit tube en verre NN′ communiquant en outre au tube UDH, et dans lequel on peut observer le niveau du mercure au moyen du curseur qui parcourt la règle verticale ZZ′.

A mesure que la vapeur arrive en U, elle se condense et retombe dans la chaudière; mais il n'en peut résulter aucune erreur, car on a soin de maintenir le tube UDH à une température constante dans sa longueur UD par un courant d'eau.

MM. Arago et Dulong ont ainsi déterminé les tensions de la vapeur d'eau jusqu'à *vingt-quatre* atmosphères. Ils ont reconnu ensuite que les relations qui existent entre les tensions et les températures peuvent être représentées avec une grande approximation par la formule

$$F = (1 + 0,7153.T)^5$$

F représente la tension exprimée en atmosphères.

T représente les températures supérieures à 100°, exprimées en prenant pour unité l'intervalle de 100°. Ainsi, pour connaître la force élastique correspondante à 136°, par exemple, il faudrait faire T = 0,36.

Il paraît bien probable que cette formule représente d'une manière assez approchée les tensions et les températures correspondantes jusqu'à 50 atmosphères.

On ne pourrait pas sans doute se fier à ces indications pour des tensions plus fortes; cependant le dernier des tableaux suivans a été calculé jusqu'à *mille atmosphères*; s'il ne représente pas la marche des phénomènes, il représente au moins la marche de la formule.

PREMIER TABLEAU.

Forces élastiques de la Vapeur d'eau depuis — 20° jusqu'à 100° centigrades.

DEGRÉS du thermom. centigrade.	TENSION de la vapeur en millimètr.	PRESSION sur un cent. carré en kilog.	DEGRÉS du thermom. centigrade.	TENSION de la vapeur en millimètr.	PRESSION sur un cent. carré en kilog.
deg.	mm.	kil.	deg.	mm.	kil.
— 20	1,333	0,0018	39	50,147	0,0681
— 15	1,879	0,0026	40	52,998	0,0720
— 10	2,631	0,0036	41	55,772	0,0758
— 5	3,660	0,0050	42	58,792	0,0799
0	5,059	0,0069	43	61,958	0,08418
1	5,393	0,0074	44	65,627	0,08916
2	5,748	0,0078	45	68,751	0,09340
3	6,123	0,0084	46	72,393	0,09835
4	6,523	0,0089	47	76,205	0,10353
5	6,947	0,0094	48	80,195	6,10900
6	7,396	0,0101	49	84,370	0,11662
7	7,871	0,0107	50	88,743	0,12056
8	8,375	0,0114	51	93,301	0,12676
9	8,909	0,0122	52	98,075	0,13325
10	9,475	0,0129	53	103,060	0,13999
11	10,074	0,0137	54	108,070	0,14710
12	10,707	0,0146	55	113,710	0,15449
13	11,378	0,0155	56	119,390	0,16220
14	12,087	0,0165	57	125,310	0,17035
15	12,837	0,0170	58	131,500	0,17866
16	13,630	0,0186	59	137,940	0,18736
17	14,468	0,0197	60	144,660	0,19653
18	15,353	0,0209	61	151,700	0,20610
19	16,288	0,0222	62	158,960	0,21586
20	17,314	0,0235	63	165,560	0,22639
21	18,317	0,0250	64	174,470	0,23758
22	19,447	0,0265	65	182,710	0,24823
23	20,577	0,0281	66	191,270	0,25986
24	21,805	0,0297	67	200,180	0,27196
25	23,090	0,0314	68	209,440	0,28454
26	24,452	0,0334	69	219,060	0,29761
27	25,881	0,0353	70	229,070	0,31121
28	27,390	0,0374	71	239,450	0,32532
29	29,045	0,0396	72	250,230	0,33996
30	30,643	0,0418	73	261,430	0,35518
31	32,410	0,0440	74	273,030	0,37094
32	34,261	0,0465	75	285,070	0,39632
33	36,188	0,0492	76	297,570	0,40428
34	38,254	0,0520	77	310,490	0,42184
35	40,404	0,0549	78	323,890	0,44004
36	42,743	0,0581	79	337,760	0,45888
37	45,038	0,0612	80	352,080	0,47834
38	47,579	0,0646	81	367,000	0,49860

DEGRÉS du thermom. centigrade.	TENSION de la vapeur en millimètr.	PRESSION sur un cent. carré en kilogr.	DEGRÉS du thermom. centigrade.	TENSION de la vapeur en millimètr.	PRESSION sur un cent. carré en kilog.
deg.	mm.	kil.	deg.	mm.	kil.
82	382,380	0,51950	92	566,95	0,77026
83	398,280	0,54110	93	588,74	0,79986
84	414,730	0,56345	94	611,18	0,83035
85	431,710	0,58652	95	634,27	0,86172
86	449,260	0,61036	96	658,05	0,89402
87	467,380	0,63498	97	682,59	0,92736
88	486,090	0,66040	98	707,63	0,96138
89	505,380	0,68661	99	733,46	0,99448
90	525,28	0,71364	100	760,00	1,03253
91	547,80	0,74152			

DEUXIÈME TABLEAU.

Forces élastiques de la vapeur d'eau, et températures correspondantes

De 1 à 24 atmosphères d'après l'observation,
Et de 24 à 50 pour le calcul.

FORCES élastiques exprimées en atmosphèr. de 76 centimètres de mercure.	TEMPÉRATURES correspondantes données par le thermomètre centigrade à mercure.	PRESSION sur un centimètre carré en kilogrammes.	FORCES élastiques exprimées en atmosphèr. de 76 centimètres de mercure.	TEMPÉRATURES correspondantes données par le thermomètre centigrade à mercure.	PRESSION sur un centimètre carré en kilogrammes.
1	100	1,033	13	193,7	13,429
1 1/2	112,2	1,549	14	197,19	14,462
2	121,4	2,066	15	200,48	15,495
2 1/2	128,8	2,582	16	203,60	16,528
3	135,1	3,099	17	206,57	17,561
3 1/2	140,6	3,615	18	209,4	18,594
4	145,4	4,132	19	212,1	19,627
4 1/2	149,06	4,648	20	214,7	20,660
5	153,08	5,165	21	217,2	21,693
5 1/2	156,8	5,681	22	219,6	22,726
6	160,2	6,198	23	221,9	23,759
6 1/2	163,48	6,714	24	224,2	24,792
7	166,5	7,231	25	226,3	25,825
7 1/2	169,37	7,747	30	236,2	30,990
8	172,1	8,264	35	244,85	36,155
9	177,1	9,297	40	252,55	41,320
10	181,6	10,33	45	259,52	46,485
11	186,03	11,363	50	265,89	51,650
12	190,0	12,396			

TROISIÈME TABLEAU.

Forces élastiques de la vapeur d'eau et températures correspondantes de cent *à* mille *atmosphères, d'après la formule empirique.*

FORCES élastiques exprimées en atmosphères.	TEMPÉRATURES correspondantes	PRESSION sur 1 centimètre carré en kilogrammes.	FORCES élastiques exprimées en atmosphères.	TEMPÉRATURES correspondantes.	PRESSION sur 1 centimètre carré en kilogrammes.
100	311,36	103,3	600	462,71	619,8
200	363,58	206,60	700	478,45	723,1
300	397,65	309,90	800	492,47	826,4
400	423,57	413,20	900	505,16	929,7
500	444,70	516,50	1000	516,76	1033,0

230. *Tension des vapeurs des divers liquides.* — On voit dans le tableau précédent qu'au point d'ébullition la vapeur d'eau a une tension qui fait équilibre à une pression atmosphérique : cette propriété est tout-à-fait générale ; la tension de la vapeur qui se forme par ébullition est toujours égale à la pression qui s'exerce sur la surface du liquide ; car si elle était moindre, la vapeur ne pourrait ni se former, ni subsister en bulle au milieu de la masse liquide, et si elle était plus forte, elle se serait formée plus tôt, rien n'empêchant qu'elle se forme dès l'instant qu'elle peut vaincre la pression. A l'ébullition les vapeurs de tous les liquides ayant des tensions égales, M. Dalton avait pensé qu'en s'écartant d'un même nombre de degrés au dessus et au dessous de ce point, les tensions ne cesseraient pas d'être encore égales entre elles. Ainsi, d'après cette *loi de Dalton*, et avec la table des tensions de la vapeur d'eau, il suffirait d'avoir le point d'ébullition d'un liquide ou la tension de sa vapeur à une température quelconque pour déterminer sa tension à toutes les températures possibles. Par exemple, l'alcool

ayant son point d'ébullition à 78°, la tension de sa vapeur à 113°, c'est-à-dire à 35° au dessus de son point d'ébullition, serait la même que la tension de la vapeur d'eau à 135°, et par conséquent de 2280^{mm} ou 3 atmosphères; et à 0, c'est-à-dire à 78° au dessous de son point d'ébullition, sa tension serait la même que celle de la vapeur d'eau à 100—78 ou à 22°, et par conséquent de 19^{mm}, 447. Pareillement l'éther sulfurique ayant à 20° une force élastique de 431^{mm},710, et l'eau ayant la même tension à 85°, il en résulterait qu'à 30° l'éther sulfurique aurait la même tension que la vapeur d'eau à 95° et à 35° la même tension que la vapeur d'eau à 100°, etc. Mais il résulte des observations de plusieurs physiciens que cette loi n'est pas absolument rigoureuse; à de grandes distances des points d'ébullition elle commence à s'écarter sensiblement de la vérité, et s'il est toujours commode de s'en servir lorsqu'on ne veut que des approximations, il serait nécessaire de l'abandonner lorsqu'on voudrait de l'exactitude. Il est donc à souhaiter que, du moins pour les liquides les plus communs, les physiciens dressent des tables de tension pareilles à la table des tensions de la vapeur d'eau.

231. *Densité de la vapeur d'eau.* — Entre tous les moyens qui ont été employés pour obtenir la densité de la vapeur d'eau, celui de M. Gay-Lussac paraît le plus simple et le plus rigoureux; il consiste à chercher directement le poids, le volume, la température et la tension d'une quantité de vapeur donnée. Pour cela on se sert de l'appareil qui est représenté dans la *figure* 201. C'est un fourneau F sur lequel repose une chaudière C en fonte dont le bord B a été travaillé de manière à former un plan qu'on ajuste avec un niveau dans la direction horizontale; G est une cloche graduée, de trois ou quatre décimètres de longueur, plongeant dans le bain de mercure de la chaudière; MM est un manchon de verre dans lequel on verse un liquide qui enveloppe la cloche dans toute sa longueur, depuis le

niveau extérieur du mercure, et qui la recouvre à son sommet; *rr* est une règle divisée qui se met verticalement au moyen de la traverse *tt*, dont la face plane se pose exactement sur le bord horizontal de la chaudière. La cloche est pleine de mercure bouilli, et en outre on y fait passer une petite ampoule de verre A, scellée par les deux bouts, et presque entièrement remplie d'eau. On met des charbons sous la chaudière; le mercure, l'ampoule et l'eau du manchon s'échauffent graduellement, et divers thermomètres donnent à chaque instant leur température commune. A un certain instant l'ampoule crève par l'effort de la dilatation de l'eau qu'elle contient, la vapeur se forme au dessus de la cloche, le mercure est déprimé, et on pousse la température jusqu'à ce que l'eau soit complètement vaporisée, c'est une condition nécessaire. Alors on maintient les choses dans cet état pour accomplir toutes les observations.

1°. L'eau étant toute vaporisée, on connaît le poids de la vapeur, car on a eu soin de peser l'ampoule vide et de la peser ensuite après l'avoir remplie; la différence des deux pesées est le poids de l'eau, et par conséquent celui de la vapeur.

2°. On observe le nombre des divisions de la cloche qu'occupe la vapeur; chacune de ces divisions ayant une capacité connue à la température *o*, on trouvera facilement, par le moyen de la dilatation du verre, sa capacité pour la température où l'on opère, et de la sorte ou aura le volume réel de la vapeur.

3°. Les thermomètres indiquent la température du liquide du manchon et celle de l'eau vaporisée dans la cloche.

4°. Enfin, on observe la tension de la vapeur au moyen de la règle *rr*. D'abord on la fait monter ou descendre, de manière que sa pointe inférieure vienne affleurer la surface du mercure de la chaudière, et ensuite on fait marcher le

voyant v jusqu'à ce que le rayon visuel rase le sommet de la colonne du mercure de la cloche. La longueur qui se trouve entre la pointe et le *voyant* est la hauteur de la colonne soulevée, on la réduit à *o*, on la retranche de la hauteur actuelle du baromètre, pareillement réduite à *o*, et la différence est la dépression de la colonne barométrique ou la force élastique de la vapeur. Si cette force approchait trop de la tension maximum pour la température à laquelle on opère, il faudrait craindre que toute l'eau ne fût pas vaporisée, et chauffer davantage pour se mettre à l'abri de cette chance d'erreur.

Ayant ainsi le poids d'un volume donné de vapeur à une température et sous une prossion connue, on en déduit aisément le poids d'un centimètre cube. Or, le poids d'un centimètre cube d'air, soumis aux mêmes circonstances de température et de pression, est facile à trouver par la formule que nous avons donnée (192) ; lorsqu'on sait qu'à 0°, et sous la pression de 760^{mm}, un centimètre cube d'air sec pèse 0^{g},0012990505, ou ce qui revient au même que sa densité est $D = 0,0012990505$. On pourra donc avoir le rapport du poids de la vapeur au poids de l'air, pris sous le même volume à la même température et à la même pression, c'est-à-dire la densité de la vapeur par rapport à celle de l'air, et M. Gay-Lussac a trouvé qu'elle en est les $\frac{5}{8}$.

Il est facile ainsi de trouver le volume que doit occuper 1$^{gr.}$ de vapeur à la température de 100°, et sous la pression maximum de 760^{mm}.

Car un centimètre cube d'air à o pesant 0^{g},0012990505 sous la pression de 760^{mm}, et ce centimètre cube devenant 1,375 lorsqu'il passe à 100° sous la même pression, l'on voit qu'alors

1^{cc},375 pèse 0^{g}.0012990505 ;

Et par conséquent que,

$$1^{gr.} \text{ occupe un volume } \frac{1,375}{0,0012990505} = 1058^{cc},47.$$

Ainsi, 1gr. de vapeur à 100° sous 760mm, doit occuper les $\frac{8}{5}$ de 1058cc,47 ou 1693cc,55; donc un centimètre cube d'eau, qui pèse 1gr., prend en se vaporisant à 100° un volume de 1693,cc55, c'est-à-dire un volume qui est environ 1700 fois plus grand; pourvu toutefois que sa force élastique soit maximum.

Enfin, avec ces données on peut trouver la densité D′ de la vapeur d'eau à une température quelconque t, et sous une pression quelconque P; car, en représentant par D sa densité à 100° sous la pression de 760mm, on verra, par un raisonnement analogue à celui que nous avons déjà fait (193), que

$$D' = D \frac{P}{760} \frac{(1 + 100a)}{(1 + at)}$$

a étant le coefficient de la dilatation, qui est commun aux gaz et aux vapeurs, et qui est 0,00375. Par cette formule on aura la densité au maximum de tension, lorsqu'après avoir donné à t une valeur, on donnera à P la valeur en millimètres de la tension maximum correspondante.

On peut s'étonner que beaucoup d'auteurs prennent la peine de discuter longuement la question de savoir si les densités de la vapeur sont ou ne sont pas proportionnelles aux tensions. On voit par la formule précédente qu'il faut bien que les densités soient proportionnelles aux tensions, lorsque les vapeurs sont réduites à une même température, et qu'il est impossible que cela soit lorsque l'on considère les vapeurs à des températures différentes; et cette formule repose sur deux vérités que personne ne conteste; savoir, premièrement, qu'au dessous du maximum de tension, les vapeurs se dilatent comme les gaz; et secondement, qu'elles se compriment suivant la loi de Mariotte.

En calculant les densités de la vapeur d'eau pour diverses températures, on voit qu'elles vont croissant d'une manière très-rapide; d'où il résulte qu'à un certain degré de chaleur la vapeur doit avoir une densité qui ne surpasse que

de très-peu la densité du liquide lui-même. Cette conséquence a été vérifiée et rendue frappante par une expérience curieuse de M. Cagniard de la Tour. Un tube de verre très-fort, étant rempli d'eau à peu près au quart de sa capacité, puis purgé d'air, et ensuite scellé, on l'expose à une température graduellement croissante; alors à un certain degré de chaleur l'eau semble disparaître, le tube est comme vide; mais en refroidissant un peu, le liquide reparaît presque subitement. On pourrait se faire une sorte de jeu de ces alternatives d'apparition et de disparition, si l'on ne devait pas, en les répétant, craindre de dangereuses explosions.

C'est à une température voisine de celle de la fusion du zinc que l'eau se vaporise complètement dans un espace à peu près quadruple de son volume à l'état liquide; en même temps elle agit sur le verre, et lui ôte sa transparence en dissolvant sans doute quelques-uns de ses élémens. D'après cela on peut présumer qu'à la température rouge, la densité de la vapeur d'eau à son maximum de tension est peu différente de la densité de l'eau liquide, et qu'alors elle a une force expansive de plusieurs centaines, et peut-être de quelques milliers d'atmosphères.

En parcourant les tableaux suivans, on pourra prendre une idée de l'accroissement de la densité de la vapeur d'eau, à mesure que la température s'élève.

PREMIER TABLEAU.

Densité et volume de la vapeur d'eau, au maximum de tension, en prenant pour unités la densité et le volume de l'eau liquide à 0.

Depuis — 20° à 100°.

Température.	Tension.	Densité.	Volume.	Température.	Tension.	Densité.	Volume.
deg.	mm.			deg.	mm.		
—20	1,333	0,00000154	650588	38	47,579	0,00004442	22513
—15	1,879	212	470898	39	50,147	4666	21429
—10	2,631	292	342984	40	52,998	4916	20343
— 5	3,660	398	251358	41	55,772	5156	19396
0	5,059	540	182323	42	58,792	5418	18459
1	5,393	573	174495	43	61,958	5691	17572
2	5,748	609	164332	44	65,627	6023	16805
3	6,123	646	154842	45	68,751	6274	15938
4	6,523	686	145886	46	72,393	6585	15185
5	6,947	727	137488	47	76,205	6910	14472
6	7,396	772	129587	48	80,195	7242	13809
7	7,871	818	122241	49	84,370	7602	13154
8	8,375	867	115305	50	88,742	7970	12546
9	8,909	919	108790	51	93,301	8354	11971
10	9,475	974	102670	52	98,075	8753	11424
11	10,074	0,00001032	99202	53	103,060	9174	10901
12	10,707	1092	91564	54	108,270	9606	10410
13	11,378	1157	86426	55	113,710	0,00010054	9946
14	12,087	1224	81686	56	119,390	10525	9501
15	12,837	1299	77008	57	125,310	11011	9082
16	13,630	1372	72913	58	131,500	11523	8680
17	14,468	1451	68923	59	137,940	12044	8303
18	15,353	1534	65201	60	144,660	12599	7937
19	16,288	1622	61654	61	151,700	13179	7594
20	17,314	1718	58224	62	158,960	13760	7267
21	18,317	1811	55206	63	166,560	14374	6957
22	19,417	1914	52260	64	174,470	15010	6662
23	20,577	2021	49487	65	182,710	15668	6382
24	21,805	2133	46877	66	191,270	16356	6114
25	23,090	2252	44411	67	200,180	17060	5860
26	24,452	2376	42084	68	209,440	17797	5619
27	25,881	2507	39895	69	219,060	18566	5386
28	27,390	2643	37838	70	229,070	19355	5167
29	29,045	2794	35796	71	239,450	20174	4957
30	30,643	2938	34041	72	250,230	21013	4759
31	32,410	3097	32291	73	261,430	21889	4569
32	34,261	3263	30650	74	273,030	22794	4387
33	36,188	3435	29112	75	285,070	23789	4204
34	38,254	3619	27636	76	297,570	24702	4048
35	40,404	3809	26253	77	310,490	25699	3891
36	42,743	4017	24897	78	323,890	26739	3741
37	45,038	4219	23704	79	337,760	27789	3599

Température.	Tension.	Densité.	Volume.	Température.	Tension.	Densité.	Volume.
deg.	mm.			deg	mm.		
80	352,080	0,0002888	3462	91	545,800	0,0004340	2304
81	367,000	30025	3331	92	566,950	44950	2224
82	382,380	31195	3206	93	588,740	46556	2148
83	398,280	32399	3087	94	611,180	48201	2075
84	414,730	33637	2973	95	634,270	49886	2005
85	431,710	34916	2864	96	658,050	51613	1938
86	449,260	36237	2760	97	682,590	53388	1873
87	467,380	37590	2660	98	707,630	55191	1812
88	486,090	38984	2565	99	733,460	57055	1751
89	505,380	40417	2474	100	760,000	58955	1696
90	525,280	41891	2387				

DEUXIÈME TABLEAU.

Densité et volume de la valeur d'eau au maximum de tension, en prenant pour unités la densité et le volume de l'eau liquide à 0 :

Depuis 1 à 24 atmosphères d'après l'observation,
Et depuis 24 à 50 d'après la formule empirique.

Températures.	FORCES élastiques exprimées en atmosph.	DENSITÉ.	VOLUME.	Températures.	FORCES élastiques exprimées en atmosph.	DENSITÉ.	VOLUME.
100	1	0,00058955	1696	193,7	13	0,0061074	163,74
112,2	1 1/2	0,0008563	1167,8	197,19	14	0,0065270	153,10
121,4	2	0,0011147	897,09	200,48	15	0,0069444	144,00
128,8	2 1/2	0,0013673	731,39	203,60	16	0,0073586	135,90
135,1	3	0,0016150	619,19	206,57	17	0,0077692	128,71
140,6	3 1/2	0,0018589	537,96	209,4	18	0,0081778	122,28
145,4	4	0,0020997	476,26	212,1	19	0,0085831	116,51
149,06	4 1/2	0,0023410	427,18	214,7	20	0,0089863	111,28
153,08	5	0,0025763	388,16	217,2	21	0,0093868	106,53
156,8	5 1/2	0,0028091	355,99	219,6	22	0,0097853	102,195
160,2	6	0,0030402	328,93	221,9	23	0,010182	98,213
163,48	6 1/2	0,0032683	305,98	224,2	24	0,010575	94,562
166,5	7	0,0034911	286,12	226,3	25	0,010968	91,171
169,37	7 1/2	0,0037217	268,82	236,2	30	0 012903	77,50
172,1	8	0,0039434	253,59	244,85	35	0,014663	68,198
177,1	9	0,0043865	227,98	252,55	40	0,016644	60,08
181,6	10	0,0048226	207,36	259,52	45	0,018497	54,064
186,03	11	0,0052557	190,27	265,89	50	0,020306	49,315
190,0	12	0,0056834	175,96				

TROISIÈME TABLEAU.

Densité et volume de la vapeur d'eau au maximum de tension, en prenant pour unité le volume et la densité de l'eau à 0.

Depuis *cent* à *mille* atmosphères d'après la formule empirique.

Températures.	FORCES élastiques exprimées en atmosph.	DENSITÉ.	VOLUME	Températures.	FORCES élastiques exprimées en atmosph.	DENSITÉ.	VOLUME
311,36	100	0,037417	26,72	462,71	600	0,17791	5,621
363,58	200	0,068635	14,570	478,45	700	0,20318	4,921
397,65	300	0,097671	10,238	492,47	800	0,2279	4,387
423,57	400	0,12534	7,978	505,16	900	0,2522	3,965
444,70	500	0,15202	6,578	516,76	1000	0,276	3,622

Densité des vapeurs de divers liquides. (Voyez le tableau de densités, page 285.)

Les densités des vapeurs de tous les liquides ne peuvent pas être déterminées par le procédé qui nous a servi pour la vapeur d'eau; mais l'on doit à M. Dumas un autre procédé dont il s'est servi avec succès dans l'important travail qu'il a publié sur ce sujet (*Ann. de physique et de chimie*, t. 33, page 337). M. Dumas prend un ballon à col effilé; il y met une quantité suffisante du liquide qu'il veut soumettre à l'expérience, puis il chauffe ce ballon dans un bain d'eau, d'acide sulfurique ou d'alliage fusible. Quand le liquide commence à entrer en ébullition, l'on modère la température et l'on chauffe aussi également qu'il soit possible toute la surface du ballon et même son col effilé. L'ébullition terminée, on chauffe encore avec les mêmes précautions jusqu'à une température un peu plus élevée; alors on note cette température avec soin, on observe le baromètre, et d'un trait de chalumeau on scelle la pointe effilée du bal-

lon. Il reste ensuite à faire trois pesées, 1°. le ballon avec la vapeur qu'il contient; 2°. le ballon plein d'eau; 3°. le ballon plein d'air sec. De la seconde on déduit la capacité, de la troisième le poids du verre, et enfin de la première le poids de la vapeur. C'est par ce moyen que M. Dumas a obtenu les nombres contenus dans le tableau de la page 285.

Au maximum de tension les vapeurs de tous les liquides connus augmentent de densité à mesure que la température s'élève. D'où il suit, que tout le liquide peut, à une température plus ou moins haute, disparaître complètement dans un espace un peu plus grand que celui qu'il occupe. C'est aussi ce que M. Cagniard de La Tour a fait voir pour l'alcool, l'éther et le sulfure de carbone. Il a de plus observé la température à laquelle se produit le phénomène, et mesuré la tension qu'exerce alors la vapeur. Pour cela, il faisait ses expériences dans un tube recourbé, semblable à peu près à un baromètre à siphon. La courte branche avait 4 à 5 millimètres de diamètre; elle contenait le liquide; et la plus longue, 1 millimètre seulement; elle contenait de l'air. Mais le liquide et l'air étaient séparés par du mercure qu'on avait d'avance versé dans la courbure quand les deux branches étaient ouvertes; le mercure refoulé par la pression pouvait remplir toute la longueur du tube à air. Les deux branches étant scellées, la colonne d'air de plus en plus réduite faisait l'office de manomètre, pour marquer la tension de la vapeur; quant à sa température, elle était donnée par celle du bain d'huile fixe, dans lequel on plongeait l'extrémité inférieure de l'appareil et toute la longueur de la courte branche.

L'instant de la disparition et de la réduction complète en vapeur arrive dans les circonstances et aux conditions suivantes :

	Température de disparition.	Volume de la vapeur par rapport au volume du liquide.	Tension de la vapeur en nombre d'atmosphères.
Alcool (à 36° Beaumé).	259°.	3.	119^atm.
Éther..	200°.	2.	37
Sulfure de carbone. . .	275°.	2.	78

233. *Condensation des vapeurs, et liquéfaction des gaz.* — Les vapeurs se condensent par compression et par refroidissement. Lorsque la vapeur sature l'espace qu'elle occupe, il suffit d'exercer sur elle une pression un peu supérieure à sa tension maximum, ou d'abaisser un peu sa température, pour qu'à l'instant elle se liquéfie dans une certaine proportion. Mais quand elle ne sature plus l'espace, elle se laisse comprimer comme les gaz, et refroidir comme eux. Cette identité parfaite, entre les propriétés caractéristiques des gaz et celle des vapeurs, avait fait supposer depuis longtemps que les gaz appelés *permanens* pourraient bien n'être que des vapeurs plus ou moins éloignées de leur maximum de tension. Plusieurs expériences avaient été tentées dans cette vue, par divers moyens, mais toujours sans succès, soit à cause de la difficulté qu'on éprouve à produire de grandes pressions, soit à cause de la chaleur qui se dégage lorsqu'on les produit subitement. Enfin, par un procédé plus sûr et plus ingénieux, sir H. Davy et M. Faraday sont parvenus à liquéfier plusieurs des fluides élastiques que l'on appelait gaz permanens. Ce procédé consiste à enfermer, dans un tube de verre très-fort, un réactif et une substance solide qui dégage, par la réaction chimique, le gaz que l'on veut soumettre à l'épreuve. Ainsi, c'est le gaz qui se comprime lui-même à mesure qu'il se dégage en plus grande abondance, et de cette manière on peut produire aisément des pressions de 40 ou 50 atmosphères. De plus, on peut refroidir l'une des extrémités du tube, pour ajouter le refroidissement à la compression.

Le tableau suivant contient, dans la première colonne, les noms des gaz liquéfiés; dans la deuxième, les diverses températures auxquelles les liquides ont été soumis; et dans la troisième, les tensions correspondantes exprimées en atmosphères. Ces tensions ne peuvent être considérées que comme des premières approximations que des expériences plus précises devront sans doute modifier.

Tableau de la liquéfaction des gaz.

NOMS DES GAZ LIQUÉFIÉS.	TEMPÉRATURES en degrés centigrades.	TENSIONS des liquides exprimées en atmosphères.
Acide sulfureux.	+ 7	2
Cyanogène.	+ 7	3,6
Chlore.	+15,5	4
Ammoniaque.	0	5
Idem.	+10	6,5
Hydrogène sulfuré.	—16	14
Idem.	+10	17
Acide muriatique.	—16	20
Idem.	— 4	25
Idem.	+10	40
Acide carbonique.	—11	20
Idem.	0	36
Oxide nitreux.	0	44
Idem.	+ 7	51

Les autres gaz ont été soumis à des expériences analogues, sans qu'on ait pu jusqu'à présent parvenir à les liquéfier.

Cependant il n'y a aucun doute qu'ils ne puissent, par leur nature, prendre aussi l'état liquide. Dans les nouveaux essais que l'on pourra tenter sur ce sujet, on se donnera des chances de succès, en produisant des froids de plus en plus vifs. Car tout annonce qu'une différence d'un seul degré de chaleur peut produire des différences de tension de plusieurs atmosphères.

CHAPITRE III.

Des vapeurs mélangées avec les gaz.

234. Les liquides qui ne se combinent pas chimériquement peuvent bien être mêlés pendant quelques instans, mais il se séparent peu à peu et se dégagent l'un de l'autre pour se superposer dans l'ordre de leurs densités, comme l'huile se superpose sur l'eau. Si les gaz et les vapeurs avaient des propriétés pareilles, tout serait changé sur la terre : on verrait, par exemple, les vapeurs qui se forment à la surface des eaux s'élever comme des ballons, en vertu de leur légèreté spécifique, et, poussées de la sorte jusqu'aux dernières couches de l'atmosphère, elles en sortiraient par leur élasticité pour se répandre de toutes parts dans le vide. L'évaporation étant continuelle, cette ascension se renouvellerait sans cesse; à la fin, les lacs et les bassins des mers seraient à sec, et toutes les eaux de la terre seraient suspendues au dessus de l'atmosphère. Il est donc visible que les fluides élastiques, dans leurs mélanges, n'obéissent pas, comme les liquides, aux lois de la densité. Cette vérité fondamentale a été mise hors de doute par une expérience directe. Berthollet avait fait descendre dans les caves de l'Observatoire deux ballons séparés par un robinet, l'un était plein d'hydrogène et l'autre d'acide carbonique, à la même pression; après les avoir disposés, l'hydrogène en haut et l'acide carbonique en bas, on attendit longtemps avant de tourner le robinet pour établir la communication. Les deux gaz étaient certainement à la même température, dans le repos le plus absolu et à l'abri de toute agitation; cependant le mélange se fit assez promptement :

la moitié de l'hydrogène, malgré sa légèreté, descendit dans le ballon inférieur, et la moitié de l'acide carbonique, malgré sa densité, s'éleva dans le ballon supérieur. Ainsi, chacun des gaz pénétra l'autre et s'étendit, par sa force expansive, pour occuper tout l'espace qui lui était offert; en doublant de volume, chacun prit une élasticité moitié; mais l'élasticité totale resta la même, c'est-à-dire égale à la somme des élasticités partielles. Ce qui arrive pour deux gaz mélangés arrive pour un plus grand nombre, et le principe général du mélange des fluides élastiques est le suivant : *Lorsqu'on accumule dans le même espace divers fluides élastiques, qui sont sans action chimique, chacun se répand dans toute l'étendue de cet espace, et l'élasticité du mélange est égale à la somme des élasticités que prendrait chacun des fluides s'il était seul.* Cette vérité peut être constatée pour les vapeurs, au moyen de l'appareil suivant. T (*Fig.* 202) est un tube large et gradué, portant à chaque extrémité un robinet en fer; le robinet supérieur s n'est pas *percé* de part en part, il est seulement *creusé*, et s'appelle, pour cette raison, *robinet à capsule*. A sa partie inférieure, le tube T communique au tube *t*, qui est plus long et plus étroit, l'on peut enlever le robinet supérieur pour faire passer dans l'appareil un courant d'air sec; alors on remet le robinet, on verse du mercure par la branche ouverte, on incline plus ou moins pour faire sortir l'air excédant, et l'on arrive aisément à avoir, dans le grand tube T, de l'air sec, qui se trouve sous la pression atmosphérique. Ensuite on met un liquide au dessus du robinet à capsule, l'on tourne ce robinet toujours dans le même sens, pour faire tomber le liquide goutte à goutte, et l'on observe les phénomènes suivans. On voit le mercure baisser peu à peu, et, en même temps, on voit la couche liquide diminuer d'épaisseur; donc la vapeur se forme dans l'air et elle se forme lentement; ce qu'on pourrait conclure aussi des évaporations qui se font librement dans l'atmosphère. Mais, ce qui

est curieux à observer, c'est que cette vapeur a un maximum de tension, et un maximum qui est dans l'air exactement le même que dans le vide. En effet, si l'on verse du mercure par la branche ouverte, pour ramener le mélange gazeux à son volume primitif, on voit que sa force élastique est plus grande qu'elle n'était d'adord, d'une quantité qui est précisément égale à la tension maximum de la vapeur, pour la température où l'on opère. On arrive encore à la même conclusion, lorsqu'on fait passer le mélange d'air et de vapeur à des pressions plus fortes, en versant une nouvelle quantité de mercure par la petite branche, ou, lorqu'on le fait passer à des pressions plus faibles en ouvrant le robinet, pour laisser sortir du mercure. Dans tous les cas, en tenant compte des variations de volume que l'air éprouve, on voit que, constamment, la force élastique du mélange est la somme des forces élastiques de l'air et de la vapeur.

La vapeur, mélangée avec un autre fluide élastique, se condense, par deux causes, comme la vapeur isolée dans le vide; savoir, par un excès de pression ou par un abaissement de température. Ainsi, l'air atmosphérique étant toujours humide, surtout dans les bases régions qui avoisinent la terre, si l'on prend, par exemple, un litre d'air à la température de 20°, sous la pression ordinaire de 760 millimètres, et que la vapeur, pour sa part, supporte 10 millimètres de cette pression, l'espace ne sera pas saturé d'humidité, mais en comprimant ce mélange gazeux, on augmentera la tension de la vapeur aussi bien que celle de l'air, et on les augmentera proportionnellement jusqu'à ce que la vapeur atteigne sa tension maximum; alors, si on exerce une compression plus grande, la vapeur sera condensée en partie et se déposera sous forme de rosée sur les parois du vase. De même, en reprenant le même litre d'air, si on le refroidissait au lieu de le comprimer, on verrait encore la vapeur se condenser, et au même degré de refroidissement que si

elle était seule et sans mélange d'aucun gaz. En généralisant ces conséquences, on voit que, dans un espace donné, dans un litre, par exemple, on peut renfermer autant de substances gazeuses que l'on voudra, sans que ces substances se gênent l'une l'autre ; il faudra seulement exercer une pression égale à la somme des pressions que chacune d'elles peut supporter. Et si un tel mélange était soumis à des pressions croissantes ou à des degrés de froid de plus en plus intenses, il présenterait des phénomènes curieux par la liquéfaction successive des divers élémens, qui s'arrangeraient ensuite suivant l'ordre de leur densité.

Les mélanges gazeux présentent une question théorique très-importante, c'est la question de savoir si les molécules de diverses natures exercent une pression l'une sur l'autre ; si, par exemple, les molécules d'air pressent les molécules de vapeur d'eau, et réciproquement. Tout semble indiquer qu'il n'y a de réaction mutuelle qu'entre les molécules de même espèce ; cependant nous verrons, en étudiant la propagation du son dans les mélanges de cette nature, qu'il y a une communication uniforme du mouvement vibratoire, qui suppose une action à distance entre toutes les molécules sans distinction.

Pour compléter ces notions générales, nous indiquerons plusieurs problèmes qui peuvent se présenter dans la pratique.

1°. Etant donné un vase *inextensible*, contenant un volume v de gaz, qui exerce une pression p contre les parois, on demande quelle pression il exercera si l'on y fait passer un liquide dont la vapeur sature l'espace avec une tension maximum représentée par f.

La pression deviendra évidemment $p + f$.

2°. Etant donné un vase indéfiniment *extensible*, contenant un volume v de gaz, sous une pression p, déterminer le volume qu'il prendra si l'on y fait passer un liquide dont la vapeur sature l'espace avec une tension maximum

représentée par f. On suppose que ni la pression extérieure p, ni la température ne changent pendant cette expérience.

A mesure que la pression intérieure augmente par la formation de la vapeur, elle diminue par l'expansion du gaz ; et comme elle doit, pour l'équilibre, rester égale à la pression extérieure p, il faudra, puisque la vapeur supporte f pour sa part, que le gaz supporte $p - f$; donc le le volume v s'accroîtra au point de devenir $\frac{vp}{p-f}$.

3°. Un mélange gazeux a une force élastique p à la température t; il prend une force élastique p' à la température t', sans que son volume change sensiblement ; on demande s'il s'est formé des vapeurs ou s'il s'en est précipité, et quel est le point d'ébullition du liquide qui a donné naissance à ces vapeurs, s'il y en a.

S'il n'y avait aucune vapeur de développée ou de condensée, la pression deviendrait $p\frac{(1+at')}{1+at}$,

ainsi, $p' - p\frac{(1+at')}{1+at}$ sera la force élastique de la vapeur perdue ou gagnée.

Supposant que la vapeur est au maximum de tension et voyant quelle est sa force élastique entre les températures t et t', on peut, d'après la loi de Dalton, trouver son point d'ébullition.

CHAPITRE IV.

De l'Ébullition et de l'Évaporation.

235. La transformation des liquides en fluide élastique s'appelle en général *vaporisation*. Les liquides se vaporisent par *ébullition*, c'est-à-dire quand les vapeurs se forment au sein de la masse ; et par *évaporation*, c'est-à-dire quand elles se forment à la surface.

236. Lorsqu'on observe l'ébullition d'un liquide, on ne voit en général qu'un mouvement plus ou moins rapide qui mêle toutes les parties de la masse, et qui les agite dans tous les sens; mais quand on excite l'ébullition dans un vase de verre, on aperçoit la cause toujours changeante qui produit les mouvemens. On reconnaît que des bulles de vapeur se forment sur les parois échauffées du vase, qu'elles s'élèvent en vertu de leur légèreté, et qu'elles viennent éclater à la surface; elles sont d'abord petites au moment où elles se forment, mais elles prennent du volume à mesure qu'elles s'élèvent, et celles qui partent des points du vase les plus chauds sont celles qui se succèdent avec le plus de rapidité. Pour que ces bulles puissent se former et s'élever au milieu de la masse liquide qui les presse de toutes parts, il faut évidemment que la vapeur dont elles se composent ait une tension égale à la pression environnante ; et c'est là ce qui détermine les points d'ébullition des différens liquides et aussi les points d'ébullition du même liquide soumis à des pressions différentes. Ainsi la première condition de l'ébullition est que la tem-

pérature soit assez haute pour que la force élastique de la vapeur puisse vaincre toutes les pressions qui se font sentir dans la masse liquide. La seconde condition, comme nous l'avons déjà vu (145), est que la vapeur trouve à absorber le calorique latent, qui est nécessaire à sa formation.

De la première condition il résulte que tout ce qui fait varier la pression du liquide ou la tension de la vapeur, fait changer aussi le point d'ébullition; et il résulte de la seconde que la rapidité de l'ébullition dépend seulement de la quantité de chaleur qui est fournie aux parois extérieures du vase dans un temps donné, et qui peut passer de là aux parois intérieures, et ensuite à la portion du liquide qui se vaporise. Ces deux conséquences exigent quelques développemens.

237. *Du point d'ébullition.* — Les causes qui peuvent faire varier le point d'ébullition d'un même liquide sont : 1° la pression qui s'exerce à sa surface; 2° sa cohésion; 3° la nature du vase qui le contient; 4° la profondeur de sa masse; 5° les substances qu'il peut tenir en dissolution.

Au niveau de la mer, sous la pression ordinaire de 760^{mm}, l'eau bout à 100°; au sommet du Mont-Blanc, dont la hauteur est de 4775 mètres, et où la pression atmosphérique est d'environ 417^{mm}, l'eau doit entrer en ébullition à la température pour laquelle la tension est 417^{mm}, c'est-à-dire à 84° environ. Si l'on pouvait s'élever plus haut, la pression devenant moindre, l'ébullition se ferait à une température encore plus basse. En général, connaissant le tableau de la tension de la vapeur d'un liquide, son point d'ébullition *sous une pression donnée* sera facile à trouver, puisqu'il sera toujours le degré de chaleur qui donne à la vapeur une tension maximum capable de vaincre cette pression. Réciproquement on pourra faire bouillir un liquide à une température donnée,

puisqu'il suffira toujours de diminuer la pression au point qu'elle soit moindre que la tension du liquide pour cette température.

Par exemple, sous une pression de 30^{mm}, l'eau doit bouillir à 30°, puisque à cette température la tension de l'eau est un peu plus grande que 30^{mm}; sous une pression de 10^{mm} l'eau doit bouillir à 11°, et sous une pression de 5^{mm} l'eau doit bouillir à 0. Ces conséquences se vérifient facilement de la manière suivante: on met de l'eau à 30°, dans un vase en verre sous le récipient de la machine pneumatique, et après quelques coups de piston, quand l'éprouvette ne marque plus que 30^{mm} de tension, l'ébullition commence avec une grande force, comme si l'eau était sur un feu très-vif, et soumise à la pression de l'air. Cette ébullition cesse bientôt, parce que la vapeur remplit le récipient et presse la surface liquide, mais par de nouveaux coups de piston, on enlève la vapeur comprimante, et on fait recommencer l'ébullition. Avec nos machines ordinaires il serait impossible de faire bouillir de l'eau à 0, puisqu'il serait impossible de maintenir le vide à 5^{mm}, à cause de la vapeur qui s'exhale sans cesse de la surface du liquide.

L'appareil qui est représenté *Fig.* 215 montre ces phénomènes d'une manière encore plus frappante. C'est un ballon à long col B, fermé par un bouchon *b*. Ce ballon est à moitié plein d'eau; on le met en pleine ébullition; et quand tout l'air est chassé on met le bouchon *b*; ensuite on le retourne dans la position que représente la figure. Lorsqu'il est à la température ambiante, on n'observe pas la moindre trace d'ébullition, et cela est tout simple; mais si l'on verse à la partie supérieure, de l'eau plus refroidie, alors l'ébullition se manifeste à l'instant avec beaucoup de force. L'eau froide fait bouillir l'eau du ballon, parce qu'elle condense la vapeur et diminue la pression qui s'exerçait sur le liquide. On peut même se donner ainsi le spectacle d'une ébullition sans feu qui dure des heures entières;

il suffit pour cela de faire chauffer l'eau du ballon à 100° ou à peu près, le refroidissement naturel qui se fait à la partie supérieure opère dans la vapeur une assez grande condensation pour déterminer l'ébullition.

La variation du point d'ébullition a aussi été vérifiée par des expériences directes sur les lieux élevés, dans les Alpes, dans les Pyrénées et sur d'autres montagnes.

L'eau bouillante n'est donc pas également chaude dans tous les lieux de la terre, et par conséquent elle n'est pas également propre aux usages domestiques et à la préparation des alimens. A Quito, par exemple, l'eau bout à 90°, et cette température est beaucoup trop basse pour cuire beaucoup de substances qui peuvent être cuites à 100°. Le tableau suivant contient des points d'ébullition de l'eau dans plusieurs lieux habités, dont les hauteurs sont bien connues.

NOMS DES LIEUX.	HAUTEUR au dessus de l'Océan.	HAUTEUR moyenne du barom.	DEGRÉ d'ébullit. de l'eau.
	mèt.	mm.	deg.
Métairie d'Antisana.	4101	454	86,3
Ville de Micuipampa (Pérou). . . .	3618	483	87,9
Ville de Quito.	2908	527	90,1
Ville de Caxamarca (Pérou).	2860	531	90,3
Santa-Fé de Bogota.	2661	544	90,9
Ville de Cuença (province de Quito).	2633	546	91,0
Mexico.	2277	572	92,3
Hospice du Saint-Gothard.	2075	586	92,9
Village de Saint-Véran (Alpes-Marit.).	2040	588	93,0
Village de Breuil (vallée du Mont-Cervin).	2007	591	93,1
Village de Maurin (Basses-Alpes). .	1902	599	93,5
Village de Saint-Remi.	1604	621	94,5
Village de Heas (Pyrénées).	1465	632	94,9
Village de Gavarnie (Pyrénées). . .	1444	634	95,0
Briançon..	1306	645	95,5
Village de Barége (Pyrénées). . . .	1269	648	95,6
Palais de Sainte-Ildefonse (Espagne).	1155	657	96,0
Bains du Mont-d'Or (Auvergne). . .	1040	667	96,5
Pontarlier.	828	685	97,1
Madrid.	608	704	97,8

NOMS DES LIEUX.	HAUTEUR au - dessus de l'Océan.	HAUTEUR moyenne du barom.	DEGRÉ d'ébullit. de l'eau.
	mèt.	mm.	deg.
Inspruck	566	708	98,0
Munich	538	710	98,1
Lausanne	507	713	98,3
Augsbourg	475	716	98,4
Salzbourg	452	718	98,4
Neufchâtel	438	719	98,5
Plombières	421	721	98,5
Clermont-Ferrand (préfecture)	411	722	98,5
Genève et Freyberg	372	725	98,6
Ulm	369	726	98,7
Ratisbonne	362	726	98,7
Moscou	300	732	99,0
Gotha	285	733	99,0
Turin	230	738	99,1
Dijon	217	740	99,2
Prague	179	743	99,3
Mâcon (Saône)	168	744	99,4
Lyon (Rhône)	162	745	99,4
Cassel	158	745	99,4
Gottingue	134	747	99,5
Vienne (Danube)	133	747	99,5
Milan (Jardin botanique)	128	748	99,5
Bologne	121	749	99,5
Parme	93	751	99,6
Dresde	90	752	99,6
Paris (Observatoire royal, 1er étage)	65	754	99,7
Rome (Capitole)	46	756	99,8
Berlin	40	756	99,8

Dans un même lieu le baromètre éprouvant des variations continuelles, il en résulte que le point d'ébullition change à chaque instant. Pour Paris les hauteurs extrêmes du baromètre observées depuis dix ans ayant été 719^{mm} et 781^{mm}, on voit que le plus haut degré d'ébullition, correspondant à 781^{mm} a été d'environ $100°,8$, et le plus bas, correspondant à 719, d'environ $98°,5$. Il est facile de voir comment on doit tenir compte de la hauteur du baromètre au moment où l'on marque le point d'ébullition sur l'échelle d'un thermomètre.

Le révérend F. J. H. Wollaston a construit un thermo-

mètre très-sensible, marquant seulement les degrés qui avoisinent le point d'ébullition, et au moyen duquel on peut constater la différence de température entre l'eau qui bout à un étage et celle qui bout à l'étage supérieur. La construction de ce thermomètre exige beaucoup de précautions; mais ce qu'il y a d'essentiel, c'est que chaque degré y occupe une longueur de trente millimètres au moins.

Lorqu'on augmente la pression au lieu de la diminuer, on retarde l'ébullition, et on peut la retarder indéfiniment en augmentant indéfiniment la pression. C'est ainsi que dans l'appareil si connu sous le nom de *marmite à Papin* ou de *digesteur de Papin*, on peut élever l'eau jusqu'aux plus hautes températures sans la faire bouillir. Cet appareil n'est autre chose qu'un vase cylindrique en bronze ou en fer, dont les parois sont capables d'une grande résistance. L'ouverture en est petite, et on la ferme avec une soupape sur laquelle on met des poids de manière à produire une pression de quarante ou cinquante atmosphères suivant la force des parois. L'ébullition est impossible, puisque la vapeur qui se forme au dessus du liquide exerce une pression toujours suffisante pour l'empêcher; mais lorsqu'on ouvre la soupape l'eau s'élance en vapeur avec une telle impétuosité qu'elle forme un jet de vingt ou trente pieds de hauteur: en même temps le vase est fort refroidi à cause de la chaleur qu'il a dû fournir à l'eau pour sa vaporisation.

Le digesteur fut inventé par Papin, vers le milieu du dix-septième siècle; il servit alors à une foule d'expériences curieuses, soit pour montrer la puissance mécanique de la vapeur, soit pour montrer la puissance dissolvante de l'eau, maintenue liquide à des températures plus hautes que 100°. Ce ne fut pas sans un grand étonnement que l'on vit alors la possibilité d'extraire des os une substance nutritive aussi bonne et presque aussi abondante que celle qui se tire des parties musculaires les plus succulentes.

L'*autoclave* est un appareil de même genre que le digesteur de Papin; il en diffère seulement par une ingénieuse modification. Outre l'ouverture de la soupape, qui est toujours très-petite, l'autoclave porte une autre ouverture, de grandeur arbitraire et de forme essentiellement *elliptique*; par l'avantage de cette forme, le couvercle, quoique plus large, peut être mis en dedans; alors c'est la tension de la vapeur qui le presse contre les parois; ainsi l'appareil se *ferme de lui-même*, et se ferme d'autant mieux que la tension est plus forte.

Si l'eau n'est pas hermétiquement enfermée dans une chaudière, et s'il se trouve quelque issue par où la vapeur puisse s'échapper, le point d'ébullition dépend alors de la grandeur de l'ouverture, comparée à la surface de l'eau qui reçoit l'action du feu. Voici un tableau des températures approchées que peut prendre l'eau dans ces circonstances sous la pression ordinaire :

Température que prend l'eau dans la chaudière.	Rapport de la surface de l'orifice à la surface de l'eau qui reçoit le feu.
100°	$\frac{1}{1000}$ et au dessus.
105	$\frac{1}{3000}$
115	$\frac{1}{10000}$
138	$\frac{1}{20000}$

Il paraît que, dans le même temps, la quantité de vapeur qui sort par chacune de ces ouvertures est à peu près la même. Ainsi, en 1′, le poids d'eau vaporisée qui s'élève d'une chaudière tout à-fait ouverte à 100° de température, serait à peu près le même que le poids d'eau vaporisée qui jaillirait de la même chaudière à 138°, par une ouverture dont la surface serait $\frac{1}{20000}$ de celle de l'eau qui reçoit le feu.

2°. La cohésion du liquide peut avoir une influence pour

modifier ce principe, qu'à la température de l'ébullition la force élastique de la vapeur est égale à la pression de l'air. En effet, les petites bulles de vapeur ne pouvant se former sans écarter les molécules qui les environnent, on conçoit qu'à leur naissance elles ont à rompre la cohésion du liquide et à vaincre la pression extérieure. Or, si la cohésion est une résistance sensible, il faudra que la force élastique de la vapeur soit capable de l'emporter sur ces deux forces réunies, c'est-à-dire qu'elle soit plus grande que la pression, de toute la force qui résulte de la cohésion. Mais les bulles une fois formées, l'effet de la cohésion devient moindre, et la vapeur éprouve une sorte de détente qui augmente brusquement son volume. Ainsi, par cette cause, l'ébullition est retardée, et de plus elle est forcée de se faire par *soubresauts* et par mouvemens saccadés.

3°. La nature du vase a une influence sur le point d'ébullition. M. Gay-Lussac a observé que l'eau, par exemple, bout plus tard dans le verre que dans le métal, et il en attribue la cause à l'action moléculaire qui s'exerce alors entre le solide et le liquide, action qui est toute pareille à la cohésion, et qui produit des résultats analogues. Une tige métallique plongée dans le liquide, ou du métal en poudre jeté au fond d'un vase en verre suffisent pour ramener le point d'ébullition à ce qu'il serait dans un vase en métal. Cette précaution remédie aussi à un autre inconvénient: elle empêche les secousses et les *soubresauts*, qui projettent le liquide et qui souvent même font éclater le vase.

4°. Dans une masse liquide très-profonde, outre la pression qui s'exerce à la surface, les molécules du fond supportent encore toute la pression due à la colonne liquide supérieure. Ainsi, dans une chaudière pleine d'eau, de trente-deux pieds de profondeur, les couches du fond supportent deux atmosphères, et par conséquent, les bulles de vapeur ne peuvent s'y former, à moins que la température ne soit de 121°; c'est donc là le point d'ébullition de l'eau

pour cette profondeur. Mais les couches superficielles ne pouvant être qu'à 100°, il arrive que les couches du fond s'élèvent sans cesse, à cause de leur dilatation; qu'elles forment des bulles de vapeur à cause de l'abaissement de la pression, et, par conséquent, qu'elles se refroidissent, et passent successivement par toutes les températures, depuis 121° jusqu'à 100°. Dans les vases qui n'ont même que quelques pouces de profondeur, il se produit un phénomène analogue, avant que l'ébullition ne commence. Les couches du fond prennent aux parois du vase assez de chaleur pour se vaporiser, de petites bulles se forment et s'élèvent, mais en gagnant les couches supérieures qui sont encore trop froides, elles se condensent subitement. De là ce bruit singulier qui précède de quelques instans l'ébullition des liquides. On s'en assure aisément en faisant l'expérience dans des ballons verre, car on voit les bulles se former, s'élever un peu, et disparaître tout-à-fait.

5°. Le point d'ébullition d'un liquide n'est pas changé par les corps étrangers qui sont mécaniquement suspendus dans sa masse, comme les parcelles de sable dans l'eau; mais il est toujours changé par les corps qui sont chimiquement combinés aves sa substance. Tous les sels solubles, par exemple, retardent le point d'ébullition de l'eau; et un phénomène digne de remarque, c'est que la vapeur que donnent ces dissolutions est de la vapeur d'eau parfaitement pure, sans aucune trace des substances dissoutes. Voici les points d'ébullition de quelques dissolutions saturées.

Sel ordinaire.	109°
Muriate d'ammoniaque. . . .	114,4
Nitre	115,6
Tartrate de potasse.	116,7
Nitrate d'ammoniaque. . . .	125,3
Sous-carbonate de potasse.. .	140,0

Ainsi, dans la dissolution de sel ordinaire, par exemple, la vapeur qui se forme pendant l'ébullition est à la tempé-

rature de 109°, et sous la pression de 760; c'est-à-dire que sa tension n'est pas au maximum, ou plutôt sa tension est un maximum dépendant de son contact avec la dissolution et moindre que le maximum absolu. Il résulte de là une propriété qui est souvent utile dans les arts, c'est qu'avec de la vapeur d'eau à 100° on peut produire une température beaucoup plus haute que 100°; car, si l'on fait arriver un courant de vapeur d'eau dans une dissolution de sous-carbonate de potasse à 100°, la vapeur y sera condensée et y déposera son calorique latent, jusqu'à ce que la température de la dissolution arrive à 140°, puisqu'à ce terme seulement la force élastique de la vapeur qui arrive pourra être balancée et arrêtée par la face élastique de la vapeur qui se dégage.

Lorsqu'un liquide est combiné avec un autre liquide plus ou moins volatil que lui, il y a encore changement dans le point d'ébullition; mais alors la vapeur qui se forme est un mélange en diverses proportions des vapeurs des deux liquides. Ainsi, l'alcool avance le point d'ébullition de l'eau; l'acide sulfurique le retarde, et dans les deux cas, les vapeurs sont simplement mélangées, quoique les liquides soient chimiquement combinés.

237. *De la rapidité de l'ébullition.*—La quantité de vapeur qui se forme par ébullition dépend de la quantité de chaleur que reçoit le liquide dans un temps donné; et cette quantité de chaleur dépend : 1° de l'activité du foyer; 2° de la nature et de l'épaisseur des parois de la chaudière; 3° de l'étendue de la surface liquide qui reçoit l'action du feu.

1°. L'activité du foyer dépend de la disposition du fourneau et surtout de la nature du combustible; car le bois, le charbon, la tourbe, la houille et l'anthracite ne donnent pas, à poids égal, la même quantité de chaleur, et ils ne sont pas non plus capables de produire la même température.

2°. La surface extérieure de la chaudière peut être plus ou moins propre à recevoir l'action du feu, et à absorber la chaleur qui la frappe, et nous verrons aussi que la nature des parois et leur épaisseur ont une influence considérable sur la quantité de chaleur qui peut les traverser dans un temps donné.

3°. L'eau qui reçoit l'action du feu est celle qui touche les parois échauffées de la chaudière, et si chaque partie de ces parois fournit la même quantité de chaleur, il est évident que l'eau vaporisée dans un temps donné est proportionnelle à l'étendue de la chaudière que peut frapper la flamme. C'est ce qui est en effet confirmé par quelques expériences, dont la précision est au moins suffisante pour la pratique; il paraît que dans les circonstances les plus favorables, avec un feu aussi vif qu'il soit possible, chaque centimètre carré de la surface *de chauffe* peut vaporiser dix grammes d'eau en une heure, ou chaque mètre carré 100 kilogrammes ou 100 litres; mais dans l'usage ordinaire, le feu étant moins vif et moins soutenu, on n'obtient guère en une heure que la moitié ou le tiers de ce résultat, c'est-à-dire environ 4 à cinq grammes par centimètre carré, ou 40 à 50 litres par mètre carré. On comprend assez combien cette donnée est importante dans les arts, puisque c'est par elle qu'on peut juger d'avance des dimensions qu'il convient de donner aux chaudières à vapeur. On saura, par exemple, que, si une chaudière doit vaporiser 500 litres d'eau par heure, il faut la disposer dans le fourneau pour que 10 mètres carrés de la surface, au moins, soient directement frappés par la flamme.

238. *Table des points d'ébullition de divers liquides.*

	Degrés.	
Éther sulfurique.	37,8	Gay-Lussac.
Soufre carboné.	47,0	*Idem.*
Alcool.	79,7	*Idem.*
Dissolution saturée de sulfate de soude.	100,7	*Idem.*
Dissolution d'acétate de plomb.	102	*Idem.*
Dissolution de muriate de soude. . . .	106,9	*Idem.*
Huile de térébenthine.	157	
Phosphore.	290	
Soufre.	299	
Acide sulfurique.	310	
Huile de lin.	316	
Mercure.	350	

239. Plusieurs liquides, mis en contact avec une surface chauffée jusqu'au rouge blanc, présentent ce phénomène singulier, qu'au lieu de s'agiter et de bouillir vivement, ils se tiennent en repos et conservent leur volume, à peu près comme si la température était insuffisante pour l'ébullition. Pour en faire l'expérience sur de petites masses, on fait chauffer un creuset de verre ou de métal, et ensuite on y laisse tomber quelques gouttes d'eau; ce liquide s'arrondit alors comme le mercure sur le verre; il reste en repos pendant long-temps, ou bien il tourne sur lui-même d'un mouvement très-rapide; l'ébullition est nulle et la diminution de volume insensible. Mais si l'on retire le creuset pour qu'il se refroidisse, il arrive un moment, près de la température du rouge brun, où tout à coup le liquide bout avec violence et se trouve projeté de toutes parts. L'eau chargée d'un alcali ou de quelques sels solubles devient incapable de produire ce phénomène; elle entre alors en ébullition dans un creuset rouge-blanc, comme dans un creuset qui est chaud, sans être rouge. Cette propriété se manifeste encore dans d'autres circonstances et sur des

masses plus considérables : par exemple, une marmite à Papin assez forte pour supporter la température rouge sans explosion, pourrait alors être débouchée sans donner naissance à un jet de vapeur considérable. Ce résultat s'est présenté dans les *générateurs* de la machine à vapeur de Perkins. A la température rouge, on peut les percer de plusieurs ouvertures sans que la vapeur s'échappe, mais à une température plus basse la vaporisation s'opère et la vapeur s'élance avec une grande impétuosité. On pense en général que ce phénomène résulte d'une couche de vapeur qui se forme au contact de la surface métallique, et qui empêche la chaleur de passer du métal au liquide; car il est évident que le liquide ne s'échauffe pas assez pour bouillir. Il se pourrait bien aussi que la chaleur pût alors traverser le liquide sans l'échauffer. Quoi qu'il en soit, cette propriété est fort curieuse, et mérite de nouvelles recherches.

240. *De l'évaporation.*—L'*évaporation* est la formation de la vapeur à la surface libre des liquides, tandis que l'ébullition est, comme nous venons de le voir, la formation de la vapeur dans le sein de la masse. L'eau s'évapore à la surface des rivières, des lacs et des mers; elle s'évapore à la surface de la terre, sur le sol et sur les plantes; et il est évident qu'elle n'a pas alors une force élastique capable de vaincre la pression de l'air. Ainsi, les observations les plus communes nous font voir que la vapeur se forme sur l'eau à toutes températures, et qu'elle s'exhale dans l'air avec les plus faibles tensions. On avait d'abord présumé qu'une affinité chimique était nécessaire entre les molécules d'air et de vapeur pour que ce phénomène pût se produire; mais nous avons vu qu'il n'est nul besoin de recourir aux forces chimiques : la vapeur, quelque faible que soit sa tension, se mélange avec l'air, comme deux gaz se mélangent entre eux. La seule condition pour qu'un liquide s'évapore est donc que les couches d'air qui l'environnent ne soient pas saturées de vapeur; et comme il arrive, dans le mélange de

deux gaz, que les molécules de l'un sont un obstacle mécanique à la diffusion des molécules de l'autre, il arrive aussi, dans l'évaporation, que l'air oppose une résistance à la diffusion de la vapeur. Ainsi, dans une atmosphère parfaitement calme, l'évaporation est lente, tandis que dans une atmosphère agitée elle devient de plus en plus rapide, à cause que les couches non saturées sont sans cesse ramenées en contact avec le liquide. Un vent sec animé d'une vitesse infinie, en soufflant sur la surface d'un lac, y produirait une évaporation aussi instantanée que celle qui se produirait dans un vide infini, car les molécules de vapeur seraient emportées si vite qu'elles ne pourraient exercer aucune pression sur les molécules d'eau, pour les empêcher de se vaporiser à leur tour.

La rapidité de l'évaporation n'est pas seulement dépendante de l'agitation de l'air; elle dépend aussi de la tension de la vapeur, ou plutôt de la différence qui existe entre la tension de la vapeur qui se forme et celle de la vapeur qui est déjà formée dans l'air. Il résulte des expériences de Dalton, sur ce sujet, que la quantité de liquide qui peut se vaporiser dans un temps donné, est toujours proportionnelle à cette différence de tension. Ainsi, dans un air parfaitement sec, à 11° de température, il se vaporiserait, à surface égale, autant d'eau à peu près qu'il s'en pourrait vaporiser à 30° dans un air humide, contenant de la vapeur à vingt millimètres de tension.

Il est à peine nécessaire de remarquer que, toutes les autres circonstances étant les mêmes, la quantité d'eau qui s'évapore dans un temps donné est proportionnelle à l'étendue de la surface sur laquelle la vapeur prend naissance.

Les autres liquides s'évaporent à l'air libre, d'après les mêmes principes que l'eau; on peut dire seulement que pour eux, la rapidité de l'évaporation est proportionnelle à la tension de la vapeur; car, en général, quand ils se vapo-

risent, il n'y a pas dans l'air de vapeur préexistante qui presse la surface liquide et retarde l'évaporation.

Nous verrons, dans la Météorologie, tous les phénomènes naturels qui résultent de la formation de la vapeur, de sa suspension dans l'atmosphère et de sa condensation sous forme de pluie, de rosée, de gelée, etc.

241. *Du froid produit par la vaporisation.*— Quand un liquide est en ébullition à l'air libre, il conserve une température fixe, parce qu'il reçoit du foyer, par les parois du vase, autant de calorique que la vapeur en absorbe pour se former; quand l'ébullition se fait sous le récipient de la machine pneumatique, la température s'abaisse graduellement, parce qu'alors c'est à la masse liquide et aux corps environnans que la vapeur doit prendre le calorique latent nécessaire à sa formation. Nous verrons plus loin qu'un gramme de vapeur d'eau, en se formant par ébullition ou par évaporation, absorbe une quantité de chaleur latente, capable d'élever de 1° la température de 550 grammes d'eau liquide; ainsi, on peut juger de la rapidité avec laquelle s'abaisse la température d'une masse liquide soumise à une ébullition spontanée ou à une prompte évaporation. Nous indiquerons les expériences les plus frappantes qui reposent sur ce principe.

Congélation de l'eau dans le vide.— On met sous le récipient de la machine pneumatique un large vase en verre, contenant de l'acide sulfurique; à quelques pouces au dessus on dispose une capsule de métal très-mince et très-évasée, contenant quelques grammes d'eau: ordinairement cette capsule est portée par trois fils ou par trois bandes de métal très-déliées, qui s'ajustent sur les bords du vase en verre. Après quelques coups de piston, l'eau entre en ébullition; en continuant de faire le vide, l'ébullition cesse, et quand le vide est fait aussi complètement que possible, on attend quelques minutes: des aiguilles de glace paraissent dans la capsule, et bientôt après toute l'eau qu'elle contient

ne forme plus qu'une masse solide. Cette expérience curieuse est due à Leslie. L'acide sulfurique absorbe la vapeur d'eau à mesure qu'elle se forme, et détermine ainsi une évaporation plus prompte. Tout corps puissamment absorbant produit le même effet; la farine d'avoine, un peu torréfiée, réussit parfaitement. La capsule est très-mince, parce qu'elle doit participer au refroidissement, et on l'isole des corps voisins pour qu'elle n'en reçoive pas la chaleur. On a employé ce procédé avec quelques modifications, mais avec peu de succès, pour fabriquer de la glace à Londres.

Une congélation, fondée sur les mêmes principes, peut se faire plus commodément avec l'appareil de la *figure* 203. La boule supérieure B est à moitié pleine d'eau, et le vide a été fait en scellant la boule inférieure B′ pendant l'ébullition. Pour congeler l'eau qui est en B, il suffit de plonger la boule B′ dans un mélange réfrigérant, ou bien de la refroidir elle-même par une autre évaporation, en l'arrosant avec un liquide très-volatil.

Congélation du mercure. — On peut pousser le refroidissement par évaporation au point de congeler le mercure. Pour cela on revêt d'une petite éponge ou de quelque tissu spongieux la boule d'un thermomètre et on l'humecte de carbure de soufre, ou, ce qui vaut mieux encore, d'acide sulfureux liquide; l'évaporation est si rapide et la quantité de chaleur enlevée si considérable que la colonne de mercure se précipite à — 10, — 20, — 30°, et au bout de quelques instans tout le mercure de la boule est congelé.

Le froid qui se fait sentir sur la main lorsqu'on y laisse tomber quelques gouttes d'un liquide volatil, et en général le froid qu'on observe à la surface des corps humides, sont des phénomènes résultant de la même cause.

Les *alcarazas* dont on se sert en Espagne et ailleurs pour rafraîchir l'eau et les boissons spiritueuses, sont des vases poreux qui offrent à l'évaporation une grande surface

humide. Le liquide intérieur s'infiltre à travers les parois ; il s'évapore promptement dans un air un peu agité, et cette action se renouvelant sans cesse, le vase et le liquide qu'il contient sont maintenus par là à une température de 10, 15 ou 20° au dessous de la température ambiante.

Par une raison semblable, les plantes doivent être en général à une température plus basse que celle de l'air, car leurs tissus extérieurs font plus ou moins l'office d'alcarazas.

La transpiration abondante, et l'exhalation qui se fait sans cesse à la surface des corps vivans, sont pareillement une cause de refroidissement : nous verrons plus loin, en parlant de la chaleur animale, que le sang des animaux à sang chaud a une température fixe, qui ne peut s'élever ou s'abaisser sans les plus graves inconvéniens, et qui ne peut varier de quelques degrés sans que la mort s'ensuive. Pour l'homme, quel que soit le climat qu'il habite, cette température fixe est de 37°. Ainsi, sous la zône torride, où l'air s'élève souvent à des températures de 50°, les hommes vivent dans cette atmosphère brûlante, sans participer à sa température ; l'activité de la transpiration est sans cesse proportionnée à l'énergie de la chaleur, et ces causes contraires se balancent avec tant d'harmonie, que le sang d'un Nègre reste à peu près à 37°, comme le sang d'un Lapon.

FIN DE LA SECONDE PARTIE.

TROISIÈME PARTIE.

De la communication du Calorique.

CHAPITRE PREMIER.

De la Conducibilité.

242. La *conducibilité* est la propriété dont jouissent les corps, d'absorber la chaleur et de la répandre dans leur masse. On distingue la *conducibilité extérieure* ou la *pénétrabilité*, et la *conducibilité propre* ou la *perméabilité*. Par sa pénétrabilité, un corps laisse le calorique passer de sa surface à la surface d'un corps contigu, ou *vice versâ*; par sa perméabilité, il laisse le calorique passer d'un point à un autre de sa masse. Par exemple, une barre de fer étant plongée par une de ses extrémités dans un bain de plomb fondu, on sait que la chaleur gagne peu à peu sur la longueur de la barre, et qu'à la fin elle se fait sentir jusqu'à une grande distance. Or la quantité de chaleur qui entre par une étendue donnée de la partie plongée, dépend de la pénétrabilité; et celle qui passe d'une section à la section suivante dépend de la pénétrabilité et de la perméabilité, car elle dépend des pertes qui se font à l'extérieur par la surface libre, et de la facilité avec laquelle le calorique se propage d'une molécule du fer à la molécule suivante.

243. *Conducibilité des solides.* — Lorsqu'une barre pris-

matique très-longue est plongée dans un bain de chaleur par une de ses extrémités, toutes ses sections, diversement éloignées du bain, prennent au dessus de l'air ambiant des températures différentes; et quand l'équilibre est établi, chacune ayant la chaleur qu'elle doit conserver, on observe cette loi remarquable, que *pour des distances au bain, croissant en progression arithmétique, les excès de température décroissent en progression géométrique.* Cette loi n'a été vérifiée que pour des températures qui n'étaient pas très-hautes. Pour comparer les conducibilités propres des diverses substances, on a coutume de les revêtir de quelques couches de vernis, afin de leur donner la même pénétrabilité; mais même avec ces précautions on n'atteint le but qu'imparfaitement, en sorte que les rapports de conducibilité propre auxquels on parvient ne sont que des approximations. C'est là l'idée qu'il faut attacher aux nombres contenus dans la table suivante :

Or.	1000
Argent.	973
Platine.	981
Cuivre.	898
Fer	374
Zinc.	363
Étain.	304
Plomb.	180
Marbre.	24
Porcelaine.	12
Terre des fourneaux. . .	11

Ces nombres suffisent cependant pour montrer qu'entre les différens corps il y a une prodigieuse différence de conducibilité propre. Les métaux sont de *très-bons conducteurs* par rapport aux autres corps, et parmi eux l'or est le premier et le plomb le dernier; parmi les *mauvais conducteurs*, ceux qui paraissent les plus mauvais sont le verre et

surtout le charbon, dont les nombres proportionnels ne sont pas rapportés dans la table.

Lorsqu'on veut simplement constater l'inégale conducibilité des différens corps, on peut se servir de l'appareil d'Inghenouz. Cet appareil se compose d'une petite caisse en cuivre, sur un des côtés de laquelle on fixe perpendiculairement de petits cylindres de diverses substances de même diamètre dont chacun est recouvert d'une couche de cire. En versant dans la caisse de l'eau bouillante ou de l'huile très-chaude, la chaleur pénètre dans les cylindres et fait fondre la cire qui les recouvre; pour les uns, la cire fond jusqu'à une grande distance de la caisse, ce sont les meilleurs conducteurs; pour les autres, elle ne fond qu'à quelques lignes de distance, ce sont les mauvais conducteurs.

Tous les corps réduits en filamens très-fins ou en parcelles très-petites sont de mauvais conducteurs; ainsi le poussier de charbon, la brique pilée, le sable, le verre en poudre, tiennent très-bien la chaleur, de même que la laine, la soie, la plume, l'édredon, etc.

244. *Conducibilité des liquides.* — Les changemens de densité, qui accompagent les changemens de température, produisent dans les liquides des mouvemens continuels qui en mélangent toutes les parties; aussitôt que des molécules de la masse deviennent plus denses ou plus légères, elles tombent ou elles s'élèvent, et toutes les molécules qu'elles rencontrent participent plus ou moins à leurs températures et à leurs mouvemens. Ces phénomènes intérieurs des masses liquides peuvent être rendus sensibles par l'expérience suivante : on mêle dans de l'eau des parcelles visibles, ayant à peu près la même densité qu'elle, par exemple, de la sciure de chêne ou de buis, et ensuite on la fait chauffer ou refroidir dans une cloche à minces parois (*Fig.* 212). La température ambiante étant de 15 ou 20°, le refroidissement de la partie inférieure détermine des courans descendans contre les parois: et au milieu de la masse

un courant ascendant ; le refroidissement de la partie supérieure produirait le même effet. Au contraire, le réchauffement de la partie inférieure produit des courans ascendans contre les parois, et un courant descendant au milieu. Toute la masse participe bientôt à l'abaissement ou à l'élévation de température, et il est visible que c'est par mélange bien plus que par conducibilité. Cependant, si on échauffe la masse par le haut, les molécules réchauffées ayant la place qui convient à leur densité, nul mouvement ne se manifeste, et alors la question de la conducibilité se réduit à savoir si dans ce cas la couche supérieure seule se réchauffe, ou si la chaleur se propage de couche en couche à travers les molécules immobiles du liquide. Rumford attribait aux liquides une non-conducibilité absolue, et pour en donner la preuve, il faisait l'expérience suivante : Après avoir fait geler de l'eau au fond d'un vase en verre vv (*Fig.* 211) de manière à avoir une petite éminence de glace *e*, il versait un liquide dans le vase, et faisait descendre à une petite distance de la pointe de glace un cylindre *c* plus ou moins chaud. La chaleur du cylindre ne pouvait arriver à la glace que par la conducibilité à travers les couches liquides ; et Rumford prétendait que la glace n'éprouve pas la moindre trace de fusion. Pendant toute l'expérience, le fond du vase vv doit plonger dans la glace fondante *ff*. Cependant, d'autres expériences indiquent dans les liquides une conducibilité certaine, et il faut bien qu'il en soit ainsi, car s'ils étaient absolument non conducteurs, ils ne pourraient pas se réchauffer même par l'agitation et par le mélange de toutes les parties.

La faible conducibilité des liquides se prouve encore par une autre expérience : on perce la paroi d'un vase en verre à quelques lignes au dessous du bord, pour y faire passer un petit thermomètre que l'on fixe horizontalement ; ensuite on remplit le vase, l'on verse encore au dessus du liquide une couche d'alcool ou d'éther, à laquelle on met le feu.

Pendant toute la combustion, qui dure plusieurs minutes, le thermomètre n'est séparé de la flamme que par une couche très-mince de liquide, et cependant il monte très-peu, son ascension peut même en grande partie être attribuée au calorique qui se communique par les parois du vase.

245. *Conducibilité des gaz.* — Les gaz étant plus dilatables encore et plus mobiles que ne sont les liquides, on conçoit que les changemens de température, dans quelques points de leur masse, y produisent des courans plus nombreux et des mouvemens plus rapides. Ainsi, la conducibilité des gaz est encore plus difficile à observer que celle des liquides; cependant toutes les expériences s'accordent à montrer qu'elle est aussi très-faible, et que la chaleur ne passe que très-lentement de molécule à molécule dans les couches qui sont en repos.

Cette propriété est mise à profit dans les arts : pour conserver la chaleur dans une enceinte, ou pour l'empêcher d'y pénétrer, il suffit de faire deux enveloppes entre lesquelles on enferme hermétiquement une couche d'air d'un ou deux pouces d'épaisseur, dont on gêne les mouvemens par quelques brins de paille, ou par quelque autre substance filamenteuse.

CHAPITRE II.

Du Calorique rayonnant.

246. *De l'existence du calorique rayonnant, et de l'idée qu'on peut se former des rayons calorifiques.* — Le calorique rayonnant est celui qui passe à travers certains corps, comme la lumière passe à travers les corps diaphanes. La chaleur solaire ne vient frapper la terre qu'après avoir traversé toute la couche atmosphérique; et si l'air s'échauffe pendant un jour serein, tout le monde sait que les corps s'échauffent aussi, et qu'en général leur température est beaucoup plus haute que celle de l'air. Donc une partie de la chaleur du soleil traverse, comme la lumière, toute l'épaisseur de l'atmosphère sans être absorbée. De même, le feu d'un foyer nous échauffe à distance, sans que les couches d'air qui nous séparent de lui soient échauffées de proche en proche; car on s'aperçoit aisément qu'elles restent froides et même qu'elles peuvent être agitées et rapidement renouvelées sans qu'à la même distance on en ressente un moindre effet. Un boulet rouge de feu, suspendu au milieu d'un appartement, est encore plus propre à montrer ce phénomène: de toutes parts autour de lui on reçoit une impression de chaleur, tandis que l'air environnant qui ne le touche pas conserve à peu près son état de repos et sa température primitive. Ainsi, les corps qui sont échauffés jusqu'à donner de la lumière ont en même temps la propriété d'*émettre* autour d'eux, dans tous les sens, du calorique qui passe à travers l'air, comme la lumière passe à travers les milieux diaphanes. C'est d'après

cette analogie que l'on dit, en parlant de la chaleur, *des rayons calorifiques*, *des rayons de calorique* ou *des rayons de chaleur*, comme on dit, *des rayons lumineux* ou *des rayons de lumière*. Si, d'un point de la surface d'un corps chaud, on mène à l'extérieur une ligne mathématique dans une direction quelconque, la chaleur qui se propage suivant cette ligne est ce qu'on appelle un *rayon de calorique*. Ainsi, la flamme et les corps échauffés jusqu'à devenir lumineux lancent de toutes parts des rayons de chaleur, comme ils lancent des rayons de lumière.

On ne voit pas d'abord combien est remarquable cette propriété, parce qu'elle porte avec elle une sorte d'explication, toute naturelle en apparence, et qui ne manque pas de se présenter à l'esprit. C'est la lumière elle-même, peut-on dire, c'est la lumière de la flamme et des corps rouges qui se propage à distance et qui échauffe les corps qu'elle rencontre; il n'est donc pas étonnant que cette chaleur rayonnante se comporte comme la lumière. Mais l'on découvre bientôt l'insuffisance de cette explication; car la *chaleur obscure* est rayonnante comme la *chaleur lumineuse*. Quand le boulet de l'expérience précédente tombe par le refroidissement, du rouge blanc au rouge cerise, puis au rouge, et ensuite au rouge obscur, il ne cesse pas pour cela de donner à distance l'impression de la chaleur; enfin, quand il cesse d'être visible, même dans les ténèbres, il ne cesse pas pour cela de lancer des rayons de chaleur, de toutes parts et à de grandes distances; à défaut d'un thermomètre, on peut s'en assurer avec la main. Ces rayons, il est vrai, sont moins vifs que ceux qui viennent du même corps, tout étincelant de lumière; mais, comme eux, ils traversent l'air librement et s'en vont frapper au loin et échauffer tous les corps environnans. Le même phénomène se reproduit sans cesse autour de tous les corps, quelle que soit leur température : un vase rempli d'eau bouillante rayonne comme un boulet rouge; le corps humain, qui n'est qu'à 37°, rayonne de la

même manière; la glace elle-même et les corps plus froids que la glace jouissent aussi de cette propriété fondamentale. Ainsi, tout corps, quel qu'il soit, est, par rapport à la chaleur, ce qu'est une bougie enflammée, par rapport à la lumière: de tous les points de la flamme partent des rayons lumineux qui se répandent au loin dans l'espace; pareillement, de tous les points d'un corps quelconque partent des rayons de chaleur qui traversent l'air et se propagent librement, jusqu'à ce qu'ils rencontrent quelques corps qui les arrêtent.

Pour étudier le calorique rayonnant, on se sert avec avantage d'un thermomètre particulier, que l'on appelle *thermoscope* ou *thermomètre différentiel*.

247. *Themomètre différentiel* — Cet appareil est représenté dans la *figure* 209. Pour le construire, on prend un tube dont le diamètre intérieur est de deux ou trois millimètres, on souffle une boule à l'une de ses extrémités, et on le courbe à angle droit vers le quart de sa longueur, en arrondissant la courbure; ensuite on y fait passer de l'acide sulfurique, coloré en rouge avec du carmin, de manière que la boule soit à peu près au quart pleine. On prépare un second tube pareil au premier et on le prépare tout-à-fait de la même manière, à cela près qu'on n'y met point de liquide; enfin on les soude bout à bout par leur extrémité ouverte, de telle sorte que leur ensemble forme les trois côtés d'un rectangle, comme on le voit dans la figure. Cela fait et l'équilibre de température étant établi, il est évident que l'extrémité de la colonne liquide reste au même point dans le tube, quelle que soit la température commune des deux boules; ce point est le o de l'échelle. Mais si l'une des boules est plus chaude que l'autre, l'excès de pression de l'air qu'elle contient met la colonne liquide en mouvement et la force à marcher vers la boule la plus froide. C'est donc la différence de température seulement qui devient sensible sur cet instrument, et c'est pour cela qu'on l'appelle

thermomètre différentiel. Pour le graduer, on enveloppe une des boules avec de la neige fondante, tandis qu'on maintient l'autre à une température connue, à 20° par exemple, et l'on divise en vingt parties égales l'espace qui a été parcouru par la colonne depuis le o jusqu'au point où elle s'arrête. Les divisions peuvent être continuées des deux côtés. Cet ingénieux appareil est dû à M. Leslie, l'un des premiers et des plus habiles expérimentateurs qui aient étudié les propriétés du calorique rayonnant. Pendant que M. Leslie, en Écosse, jetait les fondemens de cette nouvelle théorie de la chaleur, Rumford, en France, se livrait à des recherches sur le même sujet et avec le même succès. Rumford avait aussi inventé, pour ses expériences, un instrument analogue au thermomètre différentiel : c'est le thermoscope qui est représenté dans la *figure* 210. Ici la colonne liquide *i*, qui sert d'index, est très-courte; et, pour régler l'instrument, de manière qu'au zéro elle en occupe le milieu, il y a un petit appendice *a*, où elle peut se loger pendant que l'équilibre de température s'établit entre les deux boules. Ensuite on la fait sortir après avoir produit avec la chaleur de la main un excès de température dans la boule *b*, qui réponde à peu près à la longueur *ai*.

248. *Pouvoir absorbant.* — Le pouvoir absorbant est la faculté qu'ont les corps de s'approprier une partie plus ou moins grande de la chaleur rayonnante qui vient tomber sur leur surface. Tous les corps ont un pouvoir absorbant, par rapport à la chaleur solaire, car tous s'échauffent aux rayons du soleil; et ils ont des pouvoirs absorbans différens, car ils s'échauffent inégalement. Ces mêmes propriétés se reproduisent par rapport à la chaleur rayonnante obscure. Un vase un peu grand, étant rempli d'eau bouillante, si on lui présente, à quelque distance, le thermomètre différentiel, de manière que l'une des boules reçoive le rayonnement, tandis que l'autre en reste abritée par un écran, on observe dans la première un excès de température très-sen-

sible, qui est une preuve de l'absorption. Cet excès de température se manifeste, quel que soit l'état de la boule exposée au rayonnement, soit qu'elle ait sa surface vitrée naturelle, soit qu'on la revête d'une feuille d'or battu, ou d'une feuille de papier ou d'une couche de noir de fumée ou d'une autre substance quelconque. Donc toute substance a la propriété d'absorber au moins en partie le calorique rayonnant qui la frappe.

La nature des corps et l'état de leur surface ont une grande influence sur le pouvoir absorbant; car les deux boules du thermomètre différentiel étant exposées de la même manière au rayonnement, l'une ayant sa surface nue, l'autre ayant sa surface noircie ou couverte de diverses enveloppes très-minces, on observe entre elles des différences de température plus ou moins marquées, suivant la nature des enveloppes qui revêtent la seconde boule. En général, les surfaces métalliques, d'or, d'argent ou d'étain, ont un pouvoir absorbant très-faible et beaucoup moindre que celui de la surface nue, tandis que la surface noircie a un pouvoir absorbant plus grand.

249. *Pouvoir réfléchissant.* — Le pouvoir réfléchissant est la faculté qu'ont les corps de renvoyer, dans des directions déterminées, une partie plus ou moins grande des rayons de chaleur qui viennent tomber sur leur surface. Une expérience frappante met en évidence cette faculté des corps. On dispose deux miroirs paraboliques M et M′ en face l'un de l'autre et à la distance de quinze ou vingt pieds (*Fig.* 213); au *foyer* du premier on met de l'amadou, de la poudre ou quelque autre substance inflammable; au foyer du second on met un boulet chauffé au rouge blanc ou des charbons allumés dont on active le feu par un courant d'air rapide. Alors, en peu d'instans, on voit l'amadou qui s'échauffe et s'enflamme. Ce n'est point la chaleur directe qui peut produire ce phénomène curieux; car à quelques pouces du boulet ou à quelques pouces du feu,

l'amadou ne s'enflammerait pas. Mais les rayons calorifiques, émanés du corps chaud, par le côté qui regarde le miroir M', tombent sur ce miroir, se réfléchissent parallèlement à l'axe commun xx, traversent l'air sans s'arrêter et viennent tomber sur le second miroir M, où ils se réfléchissent de nouveau, en se dirigeant pour concourir tous et pour se concentrer au même point *f*, qui en est le foyer.

Cette expérience ne prouve pas seulement que la chaleur se réfléchit, mais elle prouve encore que la chaleur se réfléchit comme la lumière : car, une bougie étant placée en *f'*, on observerait en *f* une image nette et brillante de la flamme; c'est même par ce moyen qu'on ajuste les miroirs et qu'on détermine les positions précises des foyers *f* et *f'*. La loi remarquable de cette réflexibilité est que l'angle de réflexion est toujours égal à l'angle d'incidence. L'*angle d'incidence* est celui que le rayon incident fait avec la normale, au point d'incidence, et l'*angle de réflexion*, celui que le rayon réfléchi fait avec cette même normale, en se relevant de l'autre côté et dans le même plan.

Puisque la chaleur obscure se propage par rayonnement, comme la chaleur lumineuse, il est probable aussi qu'elle se réfléchit comme elle. En effet, si, au boulet rouge de l'expérience précédente, on substitue un corps simplement chauffé à la température de l'eau bouillante ou même à une température encore moindre, et si, en même temps, à la place de l'amadou, on met, au foyer de l'autre miroir, une des boules du thermomètre différentiel, on voit cette *boule focale* s'échauffer sensiblement. C'est bien par les rayons réfléchis qu'elle s'échauffe; car l'autre boule est, comme elle, exposée aux rayons directs et ne s'échauffe pas. La même expérience peut se faire avec un seul miroir, comme on le voit *figure* 214; *c* est un cube rempli d'eau chaude, *t* un thermomètre qui en indique les températures.

Le pouvoir réfléchissant varie comme le pouvoir absorbant, suivant la nature du corps et suivant l'état de sa sur-

face. Si les miroirs n'avaient pas le vif éclat du métal, s'ils étaient mal polis, s'ils étaient enfumés à la flamme d'une lampe ou seulement ternis, il ne seraient plus capables d'allumer l'amadou, ni de produire les autres effets que nous venons d'observer. On voit même que ces deux pouvoirs ont entre eux une liaison nécessaire : les rayons qui ne sont pas réfléchis, en tombant sur un corps, sont certainement absorbés par sa surface, à moins que le corps ne soit transparent pour la chaleur; c'est pourquoi nous dirons en général que *le pouvoir absorbant est en raison inverse du pouvoir réfléchissant*, ou bien encore que le pouvoir absorbant est *complément* du pouvoir réfléchissant.

250. *Pouvoir rayonnant.* — Le pouvoir rayonnant, qu'on appelle aussi pouvoir émissif, est la faculté qu'ont les corps de rayonner ou d'émettre de la chaleur dans tous les sens, comme les corps lumineux rayonnent ou émettent de la lumière. Après avoir montré l'existence de cette faculté, en montrant l'existence de la chaleur rayonnante, nous allons rechercher les causes qui font varier le pouvoir rayonnant d'un même corps et comparer entre eux les pouvoirs rayonnans des corps différens.

Le pouvoir rayonnant d'un corps ne dépend que de l'état de sa surface : il est d'autant moindre que la surface est plus nette et plus polie, et au contraire d'autant plus grand qu'elle présente plus de stries et d'aspérités. Pour le démontrer on prend un cube creux dont les quatre faces latérales sont de même substance et de même épaisseur : l'une d'elles a le plus haut degré de poli et de netteté, les autres sont diversement dépolies, striées et sillonnées dans des sens différens. Ce cube étant mis en présence d'un réflecteur (*Fig.* 214), à la distance de trois ou quatre pieds, on ajuste son centre pour qu'il se trouve sur l'axe, et avec une bougie on détermine le foyer f, où doit se placer la boule focale du thermomètre différentiel. Après cette disposition, le cube étant rempli d'eau chaude, ses quatre faces latérales auront

la même température, et l'on pourra successivement, sans rien déranger, les tourner en présence du réflecteur. Or, on observe, dans cette expérience, des résultats fort différens pour les différentes faces. Par exemple, la face polie produisant dans la boule focale une élévation de température de 1°, la face la plus dépolie et la plus striée pourra produire une élévation deux ou trois fois plus grande, et les autres faces des résultats intermédiaires. Donc, la même substance, à la même température, peut avoir, suivant l'état de sa surface, des pouvoirs rayonnans très-différens, et, par conséquent, perdre par le rayonnement des quantités de chaleur très-différentes dans le même temps.

Sans trop s'écarter de la vérité, on peut supposer d'une part que les quantités de chaleur que reçoit la boule focale, sont proportionnelles aux excès de température qu'elle peut prendre; on peut supposer, d'une autre part, que les quantités de chaleur qu'elle reçoit sont proportionnelles aux quantités de chaleur rayonnante émise par les faces du cube, et, par conséquent, proportionnelles aux pouvoirs rayonnans de ces faces. Donc, *les pouvoirs rayonnans sont entre eux comme les excès de température de la boule focale.* Ainsi, la face polie donnant à cette boule un excès de température de 1° et la face la plus dépolie un excès de 3°, le pouvoir rayonnant de celle-ci est trois fois aussi grand que le pouvoir rayonnant de la première.

Pour comparer les pouvoirs rayonnans des différens corps, on peut se servir d'un cube pareil au précédent, ayant des faces latérales très-minces et successivement recouvertes de substances différentes : de verre, de papier blanc, ou de diverses couleurs, de noir de fumée, etc. Toutes ces substances doivent former elles-mêmes des couches peu épaisses, afin que leurs surfaces soient exactement maintenues à la température de l'eau intérieure. En représentant par 100 le pouvoir rayonnant du noir de fumée, qui est le plus grand que l'on observe, les pouvoirs

rayonnans des autres substances seront proportionnellement représentés par des nombres plus petits, comme on le voit dans le tableau suivant :

Noir de fumée.	100
Eau.	100
Papier à écrire.	98
Crown-glass..	90
Encre de Chine.	88
Eau glacée.	85
Mercure.	20
Plomb brillant.	19
Fer poli	15
Etain, argent, cuivre, or. . .	12

Lorsqu'une surface métallique polie est légèrement humectée de quelque liquide, d'eau, d'huile, etc., son pouvoir émissif est à l'instant augmenté dans une grande proportion; une couche extrêmement mince de vernis produit un effet analogue; et, ce qui est fort remarquable, une seconde couche ajoute encore à cet effet, une troisième pareillement, et ainsi de suite jusqu'à une certaine limite d'épaisseur. Il en résulte que les rayons de chaleur ne partent pas seulement de la surface mathématique des corps; mais qu'ils partent aussi des couches inférieures, jusqu'à une profondeur sensible au dessous de cette surface. Ce qui arrive aux rayons émergens qui sont lancés au dehors doit arriver aussi aux rayons incidens qui viennent frapper les corps pour pénétrer dans leur intérieur; et, en effet, un miroir verni réfléchit un peu moins qu'un miroir nu et poli; et il réfléchit d'autant moins que la couche de vernis est plus épaisse. Donc, la réflexion se fait à une certaine profondeur au dessous de la surface mathématique de la dernière couche de vernis; car si elle avait lieu sur cette surface, elle resterait la même, quelle que fût l'épaisseur de la couche.

251. *De l'équilibre mobile de la chaleur dans une en-*

ceinte dont les parois ont une température uniforme. — Concevons une enceinte fermée de toutes parts (*Fig.* 207); supposons, pour plus de simplicité, qu'elle ait la forme sphérique, qu'elle soit vide, et que tous ses points aient au même degré le pouvoir de réfléchir, de rayonner et d'absorber la chaleur. La surface extérieure de cette enceinte étant maintenue d'une manière quelconque à une température invariable et uniforme pour tous les points, la surface intérieure aura la même température avec la même invariabilité et la même uniformité. L'équilibre aura lieu dans toute l'étendue de l'enceinte, quelle que soit sa grandeur, qu'elle ait un pied de diamètre ou qu'elle ait un million de lieues. Cela posé on peut concevoir l'équilibre de deux manières : premièrement on peut imaginer que la surface intérieure ait perdu sa faculté rayonnante, que chacun de ses points n'émette rien dans l'espace vide, et ne reçoive rien, que tout reste enfin dans le même état, et que le calorique soit immobile; secondement, on peut admettre que, malgré l'équilibre, la surface intérieure conserve encore sa faculté rayonnante, que chacun de ses points émette dans tous les sens des rayons dans le vide, et qu'il en reçoive aussi dans tous les sens, que tout change enfin à chaque instant et que le calorique soit sans cesse en mouvement, et la température sans cesse en équilibre. Ce second principe, énoncé pour la première fois par M. Prevost, de Genève, est ce qu'on appelle le principe de *l'équilibre mobile de la chaleur*. Certainement, si les parois de l'enceinte étaient lumineuses au lieu d'être chaudes, il est évident que la lumière remplirait toute l'étendue qu'elles embrassent, que les rayons se renouvelleraient à chaque instant, et que dans toutes les directions chaque point en recevrait sans cesse autant qu'il en envoie. La clarté serait toujours la même, ou, si l'on veut, toujours en équilibre, et la lumière toujours en mouvement. Les analogies frappantes qui existent entre la lumière et le calorique rayonnant ne laissent

aucun doute sur la vérité du principe de l'équilibre mobile de la chaleur. Cependant ces notions fondamentales sur le calorique rayonnant restaient vagues, et les nombreuses expériences auxquelles elles conduisaient restaient sans liaison, lorsque M. Fourier, en les soumettant à l'analyse mathématique, se plaça au premier rang parmi les géomètres et parmi les physiciens, car il eut la double gloire de reculer les bornes de l'analyse et de fonder en même temps une nouvelle théorie de la chaleur. C'est dans ses ouvrages, et dans ceux de M. de Laplace et de M. Poisson sur le même sujet, que l'on peut suivre dans tous ses développemens cette branche féconde de physique mathématique, dont les géomètres du siècle dernier n'avaient pas même soupçonné l'existence.

Nous devons nous borner ici à indiquer quelques-uns des résultats les plus simples. Dans une enceinte vide, dont les parois sont maintenues à une température constante et uniforme pour tous les points, un thermomètre placé en un lieu quelconque se réchauffe ou se refroidit jusqu'à ce qu'il arrive enfin à la température de l'enceinte elle-même. C'est alors seulement que l'équilibre est établi et que le thermomètre reste immobile.

Ce résultat est indépendant de la forme et de la grandeur de l'enceinte; il est indépendant de l'état de sa surface, c'est-à-dire des pouvoirs réfléchissant, absorbant et rayonnant de ses différens points; il est indépendant de sa température : qu'elle soit à 100° au dessous de 0, ou à 1000° au dessus, tout se passe de même; enfin, il est indépendant de la surface plus ou moins réfléchissante ou absorbante du thermomètre. Ainsi, quand l'équilibre est établi, le thermomètre s'approprie par l'absorption autant de chaleur qu'il en perd par l'émission; c'est ce qu'on exprime en disant que dans l'état d'équilibre le pouvoir absorbant d'un corps est toujours égal à son pouvoir rayonnant; mais quand le corps se réchauffe, il reçoit plus qu'il ne perd, et au con-

traire quand il se refroidit il perd plus qu'il ne gagne. Dans tous les cas il y a échange et compensation plus ou moins complète ; c'est ainsi que se résout la question du chaud et du froid, c'est-à-dire la question de savoir s'il y a des rayons frigorifiques comme il y a des rayons calorifiques. On voit, en effet, que les rayons frigorifiques n'existent pas ; dans une enceinte qui serait à 100° au dessous de 0, un corps recevrait de la chaleur des différens points de l'enceinte, car il se refroidirait moins vite que dans une enceinte à 200° au dessous de 0, et moins vite à plus forte raison que dans un espace infini où il n'y aurait ni chaleur ni température.

252. *Réflexion du froid.* — Au foyer de l'un des miroirs (*Fig.* 213) on met au lieu d'amadou, un thermomètre différentiel ou même un thermomètre ordinaire ; au foyer de l'autre miroir, au lieu du boulet rouge, on met un morceau de glace ou un matras rempli d'un mélange réfrigérant, et à l'instant on observe un abaissement de température : si l'on a employé le thermomètre différentiel, la boule focale tombe à plusieurs degrés au dessous de l'autre boule, et si c'est un thermomètre ordinaire, il tombe pareillement à plusieurs degrés au dessous de la température ambiante. Telle est l'expérience curieuse de la réflexion du froid ; c'est M. Pictet, de Genève, qui la fit pour la première fois. Quelques physiciens ont voulu en conclure l'existence des rayons frigorifiques : il faut bien, disent-ils, que ces rayons existent et qu'ils soient distincts des rayons de chaleur, puisqu'en les accumulant sur le thermomètre au foyer d'un miroir, le thermomètre descend d'autant plus qu'on en accumule davantage ; mais ce raisonnement tombe quand on considère le phénomène d'une manière complète : un thermomètre est toujours dans une enceinte ; suspendu dans un appartemement, ce sont les murs et les objets divers qui forment les parois de l'enceinte avec laquelle il échange sa chaleur ; exposé à l'air libre, c'est la surface de la terre,

les nuages et le ciel qui forment une autre enceinte plus vaste et plus irrégulière, mais dont tous les points rayonnent de la chaleur sur le thermomètre et en reçoivent pareillement.

Ainsi, dans l'expérience précédente, les rayons de chaleur émanés du corps froid, en couvrant toute la surface du second miroir et en se réfléchissant vers le foyer où se trouve le thermomètre, produisent à peu près le même effet que s'ils étaient envoyés par le miroir lui-même. C'est donc comme si on présentait au thermomètre un corps froid, large comme le miroir. Or il est visible (*Fig.* 208) que, si le segment *ss* d'une enceinte devenait plus froid que le reste des parois, le thermomètre *c* éprouverait un abaissement de température et un abaissement d'autant plus grand que le segment froid aurait lui-même plus d'étendue. Au lieu de refroidir les parois elles-mêmes, si on place un corps froid entre elles et le thermomètre, le même effet est produit, le thermomètre ne perd pas plus de chaleur qu'il n'en perdait, mais il en reçoit moins, parce que le corps interposé est moins chaud que la surface de l'enceinte qu'il cache au thermomètre, et dont il intercepte les rayons.

253. *De la transmission du calorique rayonnant.* — Ce n'est pas seulement à travers l'air que passe librement le calorique rayonnant, mais il passe encore de la même manière à travers l'eau, le verre et la plupart des corps diaphanes. Un écran de verre placé entre le corps chaud et le réflecteur ne diminue pas beaucoup l'élévation de température qu'éprouvait la boule focale, et le verre lui-même ne s'échauffe que très-peu; il en est de même d'une feuille mince de mica ou de chaux sulfatée. Cependant la lumière elle-même éprouvant quelque absorption dans les corps les plus transparens, on peut conclure par analogie, et vérifier aussi par expérience, que la chaleur rayonnante est en partie absorbée, quel que soit le milieu qu'elle traverse. Voici sur ce sujet deux résultats importans qui se déduisent

sent des belles et nombreuses expériences de Delaroche.

Premièrement, la chaleur rayonnante qui émane des corps les plus chauds, traverse plus facilement les milieux diaphanes et s'y trouve absorbée en moindre proportion : par exemple, un écran de verre arrêtant les $\frac{17}{18}$ de la chaleur émise par un corps à 180°, n'arrête que les $\frac{6}{7}$ de la chaleur émise par un corps à 400°, et la moitié seulement de la chaleur émise par la flamme d'une lampe.

Secondement, la chaleur rayonnante qui a traversé une première lame de verre est absorbée en moindre proportion lorsqu'elle en traverse une seconde et une troisième. Il est probable que cette propriété singulière s'étend à tous les corps transparens, et qu'elle se manifeste aussi dans les milieux continus. D'après cela, les rayons de chaleur qui auraient traversé une couche d'air d'une certaine épaisseur, n'éprouveraient qu'une moindre absorption en traversant les couches suivantes, et pourraient ainsi se propager à des distances beaucoup plus grandes sans être complètement éteints.

CHAPITRE III.

Des Lois du Refroidissement.

254. Depuis Newton, qui, le premier, a posé quelques principes sur le refroidissement des corps, les plus habiles physiciens ont fait des expériences et des recherches mathématiques sur ce sujet. Cependant la question restait enveloppée de difficultés insurmontables, et l'on n'avait fait que quelques pas incertains vers sa solution quand MM. Dulong et Petit sont parvenus à la résoudre d'une manière complète. Leur travail, qui fut couronné par l'Académie des Sciences en 1818, est un modèle d'exactitude et d'invention, que les jeunes physiciens ne peuvent étudier avec trop de soin. Nous ne pouvons ici en donner qu'un extrait fort abrégé.

255. *Loi du refroidissement dans le vide.* — Un corps isolé au milieu d'une enceinte vide ne peut se réchauffer ou se refroidir que par l'échange de chaleur rayonnante qui se fait entre sa surface et celle de l'enceinte. Si ce corps est solide, sa nature, l'état de sa surface, sa grandeur, sa forme et la conducibilité de sa substance auront une influence sur les résultats; s'il est liquide, le mélange qui se fait par les courans maintient toute la masse à la même température, l'influence de la conducibilité disparaît, et il n'y a plus à considérer que la nature du liquide, la surface du vase, sa grandeur et sa forme. Mais pour distinguer ce qui appartient à chacun de ces élémens, il faut savoir ce qu'on appelle *vitesse de refroidissement* et *loi de refroidissement*.

Lorsqu'un corps est plus chaud que les parois de l'enceinte dans laquelle il est placé, sa température diminue à mesure que le temps s'écoule, et sa vitesse de refroidissement pour un instant donné et le rapport qui existe entre l'abaissement de la température et la durée de cet instant.

Ainsi, lorsqu'un corps est beaucoup plus chaud que l'enceinte, et que son abaissement de température est, par exemple, de 10 en 1″, sa vitesse de refroidissement est double de ce qu'elle sera, quand, après s'être refroidi de plus en plus, il arrivera à ne perdre que 5° en 1″. Depuis le premier jusqu'au dernier instant du refroidissement, la vitesse est donc changeante et toujours décroissante, et l'on appelle loi de refroidissement la liaison qui existe entre toutes ces vitesses successives. Il en résulte que, pour deux corps donnés, les vitesses de refroidissement peuvent être fort différentes, tandis que la loi de refroidissement est la même; car il suffit pour cela que les vitesses correspondantes aux mêmes instans aient entre elles les mêmes rapports. MM. Dulong et Petit se sont d'abord assurés, par de nombreuses expériences, que la loi de refroidissement des liquides est toujours la même, et qu'elle ne dépend ni de la nature ni du volume du liquide, ni de la forme ni de la surface du vase, ni de la grandeur ni du pouvoir rayonnant de l'enceinte. Cette loi générale de refroidissement repose sur les principes suivans.

1°. Lorsqu'un corps est en équilibre de température dans une enceinte sans pouvoir réfléchissant, dont la température est constante, la vitesse de son refroidissement est égale à la vitesse de réchauffement que l'enciente tend à lui imprimer.

2°. La vitesse *absolue* de refroidissement d'un corps (c'est-à-dire celle qu'il aurait s'il ne recevait aucun rayon pour compenser ses pertes) augmente en progression géométrique lorsque la température de ce corps augmente en progression arithmétique.

Ainsi m étant la vitesse de son refroidissement à la température o, $m\,a^{t}+\theta$ sera la vitesse pour la température $t+\theta$. La *raison* a de cette progression est la même pour tous les corps quelle que soit leur nature. D'après cela, quand un corps dont la température est $t+\theta$ se trouve dans une enceinte dont la température est θ, sa vitesse *réelle* de refroidissement n'est autre chose que sa vitesse *absolue*, diminuée de la vitesse de *réchauffement* due au calorique qu'il reçoit de l'enceinte. Cette vitesse de réchauffement est facile à trouver : en effet, l'enceinte étant à o, désignons par k sa vitesse absolue de refroidissement, c'est-à-dire celle qui se produirait si le calorique, au lieu de sortir d'un point de sa paroi pour aller tomber sur un autre, était détruit à l'instant même où il sort. Toute cette chaleur, que nous supposons ainsi anéantie, n'est pas absorbée par le corps; en réalité, il n'en arrête qu'une partie, qui lui donne un réchauffement dont la vitesse est m; car cette même quantité m, qui représente sa vitesse absolue de refroidissement quand il est à o, doit représenter aussi la vitesse de réchauffement qu'il éprouve de la part d'une enceinte qui est à o comme lui, et dans laquelle il est en équilibre. A la température θ, l'enceinte au lieu d'avoir une vitesse absolue de refroidissement égale à k, aura, par le second principe, une vitesse représentée par $k\,a^{\theta}$; et pareillement, au lieu de donner au corps une vitesse de réchauffement égale à m, elle lui donnera une vitesse de réchauffement égale à $m\,a^{\theta}$; c'est donc là ce qu'il faut retrancher de $m\,a^{t}+\theta$ pour avoir la vitesse réelle de refroidissement du corps; et l'on a enfin, en représentant par v la vitesse de refroidissement,

$$v = m\,a^{t}+\theta - m\,a^{\theta},$$

ou

$$v = m\,a^{\theta}\,(a^{t}-1).$$

Telle est la loi remarquable du refroidissement dans une enceinte vide et qui ne réfléchit pas.

La valeur de a, qui est la même pour tous les corps, a été trouvée par expérience égale à 1,0077.

La valeur de m est variable pour les différens corps, et de plus elle est variable pour le même corps, suivant la masse et la forme qu'on lui donne, et suivant l'état de sa surface.

Ces expériences fournissent un moyen rigoureux de comparer les pouvoirs rayonnans des corps à des températures très-élevées; et l'on trouve que le rapport de ces pouvoirs ne varie pas avec la température. Ainsi le rapport du pouvoir rayonnant du verre à celui de l'argent mat est 5,707 aux températures voisines de 300° comme aux températures voisines de 100°.

On peut voir aisément que, si l'enceinte avait un pouvoir réfléchissant, la loi de refroidissement serait la même, si ce n'est que m ne serait plus la vitesse absolue du refroidissement du corps à la température 0.

256. *Loi du refroidissement dans les gaz.* — Un corps qui se refroidit dans une enceinte remplie de gaz, se refroidit par deux causes; 1° par le rayonnement; 2° par le contact du gaz. Or, un premier résultat très-remarquable, c'est que la présence du gaz ne modifie en aucune manière les échanges de chaleur qui se font par rayonnement; d'où il résulte que, le refroidissement total qu'éprouve un corps plongé dans un gaz étant connu, il suffit d'en retrancher le refroidissement que ce corps éprouve dans le vide, pour avoir la partie du refroidissement qui est due au contact seul du gaz.

Les fluides élastiques qui ont été soumis à l'expérience sont: l'air, le gaz hydrogène, l'acide carbonique et le gaz oléifiant; voici les lois générales de leurs pouvoirs refroidissans.

1°. Les pertes de chaleurs dues au contact du gaz sont, toutes choses égales d'ailleurs, indépendantes de l'état de la surface du corps qui se refroidit.

2°. Les pertes de chaleur dues au contact d'un gaz crois-

sent avec les excès de température, suivant une loi qui reste la même, quelle que soit l'élasticité du gaz.

3°. Pour une même différence de température, le pouvoir refroidissant d'un même gaz varie en progression géométrique, lorsque sa force élastique varie elle-même en progression géométrique; et, si l'on suppose le rapport de cette seconde progression égal à 2, le rapport de la première sera 1,366 pour l'air, 1,301 pour l'hydrogène, 1,431 pour l'acide carbonique, et 1,415 pour le gaz oléifiant.

257. Les propriétés du calorique rayonnant et les lois du refroidissement dans le vide et dans les gaz trouvent leurs applications dans une foule de phénomènes naturels. Nous verrons dans les *Elémens de Météorologie* que c'est en partant de ces principes que l'on peut expliquer la gelée, le givre et la rosée; que l'on peut rendre raison des températures de la terre aux diverses latitudes, de la température des eaux et des différentes régions de l'air, et que l'on peut enfin mesurer avec exactitude la quantité totale de chaleur que, dans une année, le soleil verse sur la terre.

FIN DE LA TROISIÈME PARTIE.

QUATRIÈME PARTIE.

De la mesure de la Chaleur, et des causes qui la produisent.

CHAPITRE PREMIER.

Du Calorique spécifique.

258. *Des quantités de chaleur et des moyens de les comparer.* — Nous admettons comme un principe évident de lui-même que, pour produire un même effet, il faut toujours une même quantité de chaleur. Par exemple, un kilogramme de fer étant à la température de 10°, s'il passe d'une manière quelconque à la température de 11°, nous admettons qu'il reçoit toujours la même quantité de chaleur, soit que cette chaleur lui vienne du soleil ou d'un foyer, soit qu'elle lui vienne du contact ou du rayonnement d'un corps quelconque. De même un kilogramme de glace à 0, prend toujours la même quantité de chaleur pour se fondre, quelles que soient les circonstances de la fusion; et un kilogramme d'eau à 100° prend toujours la même quantité de chaleur pour se vaporiser, soit que l'évaporation soit lente ou rapide. Pour que l'effet soit le même, il ne suffit pas toutefois qu'il se produise sur des masses égales de la même matière, mais il faut que cette matière,

identique par sa nature, soit identique aussi par l'arrangement de ses molécules. Ainsi, deux masses égales de fer, autrement travaillées, plus ou moins écrouies ou plus ou moins forgées, pourraient bien prendre des quantités de chaleur différentes pour passer de 10 à 11°; deux poids égaux de glace, pour entrer en fusion, pourraient bien prendre aussi des quantités de chaleur différentes, si l'un était, par exemple, de la glace compacte, et l'autre de la neige ou de la glace pilée; enfin, une même quantité d'eau peut bien prendre en se vaporisant des quantités de chaleur différentes, suivant qu'elle se vaporise à 0, par exemple, ou à 100° de température.

D'après ce principe fondamental, nous pourrons comparer des quantités de chaleur données, toutes les fois que nous pourrons les appliquer successivement à produire un même effet, c'est-à-dire à élever la température d'un corps, ou à liquéfier un solide, ou à vaporiser un liquide. Mais comme il faut pour cela que le calorique sorte des corps où il se trouve, pour passer dans les corps où il doit produire un de ces effets, il en résulte que nous ne pouvons jamais comparer les quantités totales ou absolues de calorique que possèdent les corps; car nous ne pouvons jamais les épuiser de tout le calorique qu'ils contiennent. Nos mesures sont restreintes aux seules quantités de chaleur que nous pouvons faire sortir des corps.

On dit qu'une substance a plus ou moins de *capacité pour la chaleur*, suivant qu'elle exige plus ou moins de chaleur pour éprouver un changement de température donné, un changement de 1°, par exemple; et cette quantité de chaleur s'appelle elle-même la *chaleur spécifique* de la substance. Sa capacité sera *constante* lorsqu'à poids égal il faudra des quantités égales de chaleur pour élever sa température de 1° en un point quelconque de l'échelle thermométrique, c'est-à-dire pour la faire passer de 0 à 1°, de 1° à 2°, et de 100° à 101°, de 200° à 201, etc. Ainsi le

fer, par exemple, n'a pas une capacité *constante*, mais une capacité *variable* et *croissante*, parce qu'un kilogramme de fer exige une certaine quantité de chaleur pour passer de 0 à 1°, il en exige un peu plus pour passer de 100 à 101, plus encore pour passer de 200 à 201, etc. Le rapport de ses capacités pour deux points donnés de l'échelle, à 0, par exemple, et à 300°, est le rapport des quantités de chaleur qu'il exige en chacun de ces points pour éprouver des changemens égaux de température. En général, le rapport des capacités de deux substances n'est autre chose que le rapport de leurs chaleurs spécifiques, c'est-à-dire le rapport des quantités de chaleur qu'elles prennent à poids égal et au même degré, pour éprouver des changemens égaux de température. On a coutume de rapporter toutes les capacités à celle de l'eau prise pour unité; ainsi, quand on dit que la capacité d'une substance est 2, 3, 4, etc., cela signifie (à moins qu'on ne prévienne du contraire) que sa capacité est 2, 3 ou 4 fois celle de l'eau. On dirait de la même manière et dans le même sens que la chaleur spécifique d'un corps est 2, 3, 4, etc. D'après ces définitions, il sera facile de comprendre les méthodes et les instrumens que l'on emploie pour déterminer les capacités ou les chaleurs spécifiques de différens corps.

259. *Calorimètre de Lavoisier et de Laplace.* — Une coupe de cet instrument est représentée dans la *Figure* 204: il se compose de trois vases de tôle ou de fer-blanc c, c_1, et c_2, dont le plus grand c enveloppe le moyen c_1, et celui-ci à son tour enveloppe le plus petit. L'intervalle qui sépare le premier du second se remplit de glace dont l'eau de fusion s'écoule par le robinet *n*, et l'intervalle qui sépare de toutes parts le second du troisième est pareillement rempli de glace pilée dont l'eau de fusion s'écoule par le robinet *r*. Ainsi, le calorique extérieur est arrêté et absorbé par la première couche de glace, et ne peut jamais pénétrer jusqu'à la seconde couche pour y opérer une fusion; de

même le calorique intérieur, celui qui sort de la substance enfermée dans le petit vase, est entièrement absorbé par la seconde couche de glace, et employé à la fondre, sans pouvoir jamais passer dans la première couche, et, à plus forte raison, sans pouvoir jamais se perdre à l'extérieur. D'après cela, rien n'est plus facile à comprendre que l'usage de cet instrument pour résoudre les questions relatives à la capacité.

Pour savoir, par exemple, si la capacité du fer est constante, on chauffe un boulet à la température de 50°, on le met très-rapidement dans le vase, on ajuste les couvercles, et on recueille toute la quantité d'eau qui s'écoule par le robinet *r*, pendant que le boulet descend à la température 0; ensuite on refait la même expérience après avoir chauffé le boulet à 100, 150, 200, etc. Les quantités de chaleur abandonnées sont entre elles comme les quantités de glace fondues ou comme les quantités d'eau qui s'écoulent; et il est facile de voir qu'elles ne sont pas entre elles comme les nombres 1, 2, 3, 4, etc., mais dans une proportion plus rapide; ce qui prouve que la capacité du fer est croissante dans la même proportion.

Pour déterminer les capacités des différens corps, on les chauffe tous successivement à la même température, et on recueille les quantités d'eau qu'ils fournissent en retombant à la température 0. S'ils ont tous le même poids, leurs capacités sont comme les quantités d'eau qui s'écoulent; sinon il faut tenir compte du rapport des poids.

Pour les liquides, on détermine d'avance les capacités des flacons dans lesquels ils doivent être enfermés.

Au lieu du calorimètre, on peut employer un *puits de glace*, comme on le voit *figure* 205; cette méthode offre même de l'avantage, à cause de l'eau qui reste dans le calorimètre pour imbiber toute la couche de glace pilée qui enveloppe le corps.

260. *Méthode du refroidissement.* — Cette méthode,

inventée d'abord par Mayer, perfectionnée par M. Leslie, et employée aussi par M. Despretz, n'a véritablement acquis une précision suffisante qu'entre les mains de MM. Dulong et Petit; elle repose sur ce principe, que deux surfaces égales et également rayonnantes perdent dans le même temps une même quantité de chaleur lorsqu'elles sont à la même température. Supposons donc qu'un vase d'argent poli, ayant un petit volume et des parois très-minces, soit successivement rempli de différentes substances pulvérisées; en le laissant refroidir, à partir d'une même température, les quantités de chaleur perdues au premier instant du refroidissement seront toujours égales entre elles, et si, pour l'une des substances, la vitesse de refroidissement est double de ce qu'elle est pour l'autre, on en pourrait conclure que sa capacité est moitié, si son poids était le même, puisqu'en perdant une même chaleur elle se serait abaissée d'un nombre de degrés double. On conçoit qu'il y a des corrections à faire, parce qu'en général les différentes poudres contenues dans le vase d'argent ont des poids différens, et aussi parce qu'il faut tenir compte de la chaleur propre du vase d'argent lui-même.

MM. Dulong et Petit prennent un vase de petite dimension, afin que les masses soient petites; ils le prennent d'argent et à minces parois, afin que la conducibilité propre n'ait qu'une faible influence; enfin ils le prennent poli, et le font refroidir dans un air très-raréfié, avec un faible excès de température de 5° ou 10° au plus, afin que le refroidissement soit très-lent. Toutes ces précautions ont une grande influence sur les résultats.

261. *Méthode des mélanges.* — Dans cette méthode on emploie toujours deux corps : un corps chaud qui se refroidit et un corps froid qui se réchauffe, de telle façon, que toute la chaleur qui sort du premier soit employée à élever la température du second. Supposons, par exemple, que l'on jette un kilogramme de mercure à 100° dans un

kilogramme d'eau à 0°: le mercure se refroidit, et l'eau se réchauffe jusqu'à ce que le mélange ait acquis à la fin une température commune. Si cette température était de 50°, l'eau et le mercure auraient des capacités égales, puisque la même quantité de chaleur produirait dans ces deux substances, à masse égale, des changemens égaux de température, d'une part 50° d'abaissement, et de l'autre 50° d'élévation. Mais, en réalité, le mélange ne s'élève qu'à 3° environ; c'est-à-dire que le mercure perd 97°, tandis que l'eau en gagne 3: donc la capacité du mercure est beaucoup moindre que celle de l'eau; on voit qu'elle en est les $\frac{3}{97}$ ou environ les 0,03. En général, pour des masses égales, les capacités sont en raison inverse des variations des températures.

Si les masses étaient différentes, on calculerait facilement le rapport des capacités. Soit x la capacité de la substance froide, M sa masse et t sa température primitive; soit x' la capacité de la substance chaude, M' sa masse, et t' sa température; soit θ la température du mélange.

La substance chaude perd un nombre de degrés $(t'-\theta)$, et par conséquent une quantité de chaleur $M'x'(t'-\theta)$. La substance froide gagne un nombre de degrés $(\theta-t)$, et par conséquent une quantité de chaleur $Mx(\theta-t)$; mais la quantité de chaleur perdue par la première est égale à la quantité de chaleur gagnée par la seconde. Donc

$$M'x'(t'-\theta) = Mx(\theta-t),$$

d'où

$$\frac{x'}{x} \quad \frac{M(\theta-t)}{M'(t'-\theta)}$$

Cette formule suppose que le vase dans lequel on fait le mélange ne participe pas aux variations de température, et qu'il n'y ait non plus aucune chaleur perdue pendant la durée de l'expérience; mais il est facile, dans chaque cas, de faire les corrections nécessaires.

Les substances susceptibles de se combiner sont enfermées dans des flacons dont on détermine d'avance le poids et la chaleur spécifique.

262. *Calorimètre de Rumford.* — Cet appareil est surtout destiné à recueillir les quantités de chaleur abandonnées par les substances gazeuses : il se compose d'une caisse de fer-blanc ou de cuivre mince (*Fig.* 216), de 22 centimètres de longueur, sur 12 centimètres de largeur et 12 de profondeur, que l'on remplit d'un poids déterminé d'eau distillée; un thermomètre en indique à chaque instant la température ; un serpentin de métal très-mince, de forme rectangulaire, ayant 4 centimètres de largeur sur 18 millimètres d'épaisseur, s'ouvre au dessous de la caisse en forme *d'entonnoir*, et pénètre dans son intérieur où il fait diverses circonvolutions. Les produits gazeux entrent par l'entonnoir, parcourent le serpentin où ils se dépouillent de leur excès de chaleur et sortent enfin à la température de l'eau de la caisse. Pour que l'appareil conserve exactement toute la chaleur qu'il reçoit sans la dissiper au dehors, on détermine par des épreuves préalables la température à laquelle il doit s'élever au dessus du milieu ambiant; s'il doit s'élever par exemple de 5°, on s'arrange pour lui donner une température de 5° au dessous au moment où l'on commence l'expérience; alors pendant qu'il se réchauffe pour arriver à la température ambiante, il reçoit du calorique extérieur à peu près autant qu'il en perd lorsqu'il dépasse cette température pour arriver à 5° au dessus.

C'est avec un calorimètre de cette espèce que MM. de la Roche et Bérard ont déterminé les chaleurs spécifiques des gaz. On conçoit aisément quelle habileté il faut pour des recherches aussi délicates, combien il y a de précautions à prendre et de corrections à faire.

263. *Capacité des solides et des liquides.*

Les tableaux suivans contiennent les résultats qui ont été obtenus par les divers procédés.

I. *Tableau des capacités déterminées par MM. Lavoisier et de Laplace.*

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS.
Eau.	1,0000
Plomb.	0,0282
Mercure.	0,0290
Etain..	0,0475
Oxide rouge de mercure.	0,0501
Fer battu.	0,1105
Verre sans plomb.	0,1929
Soufre.	0,2085
Chaux vive.	0,2169
Huile d'olive.	0,3096
Acide sulfurique, densité 1,87.	0,3346
Acide nitrique, densité 1,30.	0,6614
Solution de nitre (nitre 1, eau 8). . . .	0,8187

II. *Tableau des capacités déterminées par la méthode des mélanges, par MM. Dulong et Petit.*

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS moyennes entre 0 et 100°.	CAPACITÉS. moyennes entre 0 et 300°.
Eau.	1,0000	»
Mercure.	0,0330	0,0350
Platine.	0,0335	0,0355
Antimoine.	0,0507	0,0547
Argent.	0,0557	0,0611
Zinc.	0,0927	0,1015
Cuivre.	0,0940	0,1013
Fer.	0,1098	0,1218
Verre.	0,1770	0,1900

III. *Tableau des capacités déterminées par la méthode du refroidissement de MM. Dulong et Petit.*

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS, celle de l'eau étant prise pour unité.	POIDS des atomes, l'atome d'oxigène pesant 1.	PRODUITS du poids de chaque atome par la capacité correspond.
Bismuth.	0,0288	13,30	0,3830
Plomb.	0,0293	12,95	0,3794
Or.	0,0298	12,43	0,3704
Platine.	0,0314	11,16	0,3740
Etain.	0,0514	7,35	0,3779
Argent.	0,0557	6,75	0,3759
Tellure.	0,0912	4,03	0,3675
Zinc.	0,0927	4,03	0,3736
Cuivre.	0,0949	3,957	0,3755
Nickel.	0,1055	3,69	0,3819
Fer.	0,1100	3,392	0,3731
Cobalt.	0,1498	2,46	0,3685
Soufre.	0,1880	2,011	0,3780

Les résultats de MM. Dulong et Petit sont extrêmement remarquables.

Le 2e tableau fait voir que les capacités vont en croissant d'une manière sensible à mesure que la température s'élève ; il est probable que ce résultat est général.

Le 3e tableau indique une loi fondamentale de la théorie de la chaleur; il indique que la capacité d'un corps simple multipliée par le poids de son atome donne un produit constant ; car la 4e colonne, qui représente ces produits, ne contient que des nombres très-peu différens, dont la moyenne ne s'écarte pas sensiblement de 0,375 : ce qui signifie, en d'autres termes, que *les atomes des corps simples ont tous exactement les mêmes capacités pour la chaleur*. Ce résultat se vérifie d'une manière si frappante

pour toutes les substances élémentaires rapportées dans le tableau, qu'il est permis d'espérer qu'un jour il sera généralisé par l'expérience, et qu'il constituera une des découvertes les plus importantes que nous puissions faire sur la chaleur. Il paraît résulter aussi de quelques essais de MM. Dulong et Petit, sur les corps composés, qu'il existe toujours un rapport simple entre la capacité des atomes composés et celle des atomes élémentaires.

264. *Capacité des gaz.* Les gaz n'ayant en général qu'une petite masse sous un grand volume, leurs molécules tendant sans cesse à s'échapper, et les pressions qu'ils supportent étant sans cesse changeantes, on conçoit qu'il est difficile de déterminer avec précision leurs capacités pour la chaleur. Ne pouvant entrer ici dans le détail de ces expériences délicates et compliquées, nous nous contenterons de rapporter les résultats qui ont été obtenus par MM. de la Roche et Bérard.

Tableau des chaleurs spécifiques des gaz, d'après MM. de la Roche et Bérard.

NOMS DES SUBSTANCES.	CAPACITÉS à volumes égaux, celle de l'air étant 1.	CAPACITÉS à masses égales, celle de l'air étant 1.	CAPACITÉS à masses égales, celle de l'eau étant 1.
Air atmosphérique. .	1,0000	1,0000	0,2669
Hydrogène.	0,9033	12,3401	3,2936
Oxigène.	0,9765	0,8848	0,2361
Azote.	1,0000	1,0318	0,2734
Oxide de carbone . .	1,0340	1,0805	0,2884
Acide carbonique . .	1,2588	0,8280	0,2210
Oxide d'azote. . . .	1,5503	0,8878	0,2369
Gaz oléifiant.	1,5530	1,5763	0,4207
Vapeur aqueuse. . .	1,9600	3,1360	0,8470

Nous venons de voir que les capacités des solides et des liquides paraissent en général devenir croissantes à mesure que les températures s'élèvent; mais on admet au contraire que *sous la même pression la capacité d'une masse gazeuse est indépendante de la température*, c'est-à-dire, en d'autres termes, que, sous une pression constante, les dilatations qu'elle éprouve sont proportionnelles aux quantités de chaleur qu'elle reçoit. M. de Laplace admet en outre dans sa théorie des gaz (*Mécanique céleste*, liv. XII) un second principe fondamental: savoir, qu'il y a un rapport *invariable* entre *la capacité d'un gaz à pression constante* et *sa capacité à volume constant*. Sa capacité à pression constante est la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de 1°, en lui permettant de se dilater sous la même pression; et sa capacité à volume constant est la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de 1°, en le comprimant à mesure, pour que son volume ne change pas.

La première de ces capacités est évidemment plus grande que la seconde, puisque tous les gaz dégagent de la chaleur quand on les comprime; ainsi, ce rapport étant désigné par k, la valeur de k sera toujours plus grande que l'unité. On ne la connaît jusqu'à présent que pour l'air et la vapeur d'eau; pour l'air, on a, d'après les expériences de MM. Gay-Lussac et Welter, $k = 1{,}375$; pour la vapeur d'eau, M. Poisson trouve, d'après les expériences de MM. Clément et Desormes, que l'on aurait $k = 1{,}073$. En s'appuyant sur ces seuls principes, M. Poisson arrive par le calcul (*Ann. de Chimie*, t. 23, pag. 337) à une formule générale qui donne la capacité d'un gaz sous une pression quelconque, lorsqu'on connaît sa capacité sous une pression donnée, par exemple, sous la pression de 760^{mm}. Cette formule est la suivante:

$$x = c\left(\frac{760}{p}\right)^{1-\frac{1}{k}}.$$

c est la capacité du gaz par rapport à l'eau.

p est la pression pour laquelle on veut connaître sa capacité.

x est la capacité cherchée.

Pour l'air on a $c = 0{,}2669$, $\kappa = 1{,}375$; et la formule devient

$$x = 0{,}2669 \left(\frac{760}{p}\right)^{1 - \frac{1}{1{,}375}}.$$

La capacité décroît quand la pression augmente, et, sous une pression de 1000 atmosphères, elle n'est plus que $\frac{1}{25}$ à peu près de la capacité de l'eau; au contraire elle est croissante à mesure que la pression diminue, et quand elle est réduite à 4 ou 5 millimètres à peu près, la capacité de l'air devient égale à celle de l'eau. Cette propriété est, comme nous le verrons, une des principales causes du froid si étonnant qui règne dans les hautes régions de l'air.

CHAPITRE II.

Du Calorique latent.

265. *Calorique de fluidité.* — Nous avons déjà indiqué (145 et 223) les observations dans lesquelles on reconnaît l'absorption du *calorique latent* ou du *calorique de fluidité* pendant la liquéfaction des corps. Il est visible maintenant que ces quantités de chaleur peuvent être déterminées par les moyens qui viennent de nous servir à comparer les chaleurs spécifiques des corps; et entre ces moyens, le calorimètre et la méthode des mélanges seront les deux plus simples.

266. *Calorique de fluidité de la glace.* — Pour le déterminer avec précision, il suffit de prendre un poids connu de glace fondante, 1 kilogramme, par exemple, et d'y mêler très-promptement 1 kilogramme d'eau à 75°; après quelques instans, la glace est fondue, et l'on a deux kilogrammes d'eau liquide, dont la température est 0, comme la température de la glace. Donc toute la quantité de chaleur qui maintenait le kilogramme d'eau à 75° au dessus de 0, a été absorbée par la fusion du kilogramme de glace, et se trouve ainsi la mesure exacte de sa chaleur latente. Quand la température ambiante est plus haute que 0, l'eau chaude perd de sa chaleur pendant qu'on la verse, et, au contraire, le vase où se fait le mélange reçoit du calorique extérieur pendant toute la fusion; alors on n'arrive au résultat précédent qu'après les corrections nécessaires. Dans tous les cas, il importe que le mélange se fasse promptement, et pour cela il convient de prendre de la

glace pilée, ou de la neige plutôt que de la glace compacte en un seul bloc.

La capacité de l'eau étant sensiblement constante entre 0 et 100°, la chaleur qui fait passer $1^{kil.}$ d'eau de 0 à 75° est sensiblement égale à celle qui fait passer $75^{kil.}$ d'eau de 0 à 1°, ou plus généralement elle est égale à celle qui fait passer $m^{kil.}$ d'eau de 0 à $\frac{75°}{m}$. D'après ce principe on peut varier l'expérience précédente de mille manières; et l'on peut aussi résoudre une foule de questions avec lesquelles il est bon de se rendre familier.

Par exemple : Combien faut-il mêler de glace fondante dans $10^{kil.}$ d'eau à 100°, pour réduire la température à 0 après la fusion complète de la glace?

Combien faut-il de kilogrammes d'eau à 50° pour fondre $50^{kil.}$ de glace fondante, et pour que la température du mélange après la fusion complète soit de 10°?

Lorsqu'on mêle $20^{kil.}$ d'eau à 90° avec $\frac{1}{2}^{kil.}$ de glace fondante, quelle est la température du mélange?

Qu'arriverait-il si les $20^{kil.}$ d'eau à 90° étaient mêlés avec $100^{kil.}$ de glace fondante?

Le calorimètre de MM. Lavoisier et de Laplace peut servir à déterminer le calorique de fluidité de l'eau; il suffit pour cela de jeter dans son intérieur une masse d'eau de poids et de température connue, et d'observer la quantité de glace fondue; $1^{kil.}$ d'eau à 10° donnerait, par exemple, $1,133^{kil.}$ d'eau à 0; d'où l'on déduirait facilement que $1^{kil.}$ d'eau à 75° donnerait $2^{kil.}$ d'eau à 0.

267. Le calorique de fluidité des autres substances se détermine par des procédés analogues. On admet assez généralement qu'un corps a d'autant plus de calorique de fluidité que son point de fusion est plus élevé; mais cette loi demanderait confirmation : elle repose seulement sur trois expériences de Black, qui sont sans doute assez imparfaites. Ces expériences sont relatives au spermacéti, à la cire et à l'étain. D'après Black,

1 kilogramme de spermacéti, en se congelant, pourrait fondre. . . . . 1^kil.,1 de glace.
1 kilogramme de cire. . . . . 1^kil.,3
1 kilogramme d'étain . . . . . 3^kil.,7

268. *Calorique d'élasticité.* — Nous appellerons ainsi le *calorique latent* qu'un liquide absorbe en se vaporisant; son existence nous est démontrée par la fixité de la température pendant l'ébullition des liquides (145 et 235) et par le refroidissement produit pendant leur évaporation (241). Le calorique d'élasticité qui est propre à chaque vapeur se détermine à peu près comme le calorique de fluidité qui est propre à chaque liquide, c'est-à-dire par le calorimètre ou par la méthode des mélanges.

269. *Calorique d'élasticité de la vapeur d'eau.* — La méthode la plus ordinaire pour le déterminer consiste à faire bouillir de l'eau distillée dans un matras à long col, ou dans une cornue, et à condenser dans une masse d'eau toute la vapeur qui s'échappe; de l'augmentation de poids de cette masse d'eau on déduit la quantité de vapeur qui s'est condensée, et de l'élévation de température qu'elle prend on déduit la quantité de chaleur que cette vapeur a dégagée. Supposons, par exemple, que le vase où la vapeur se condense contienne d'abord 550^gr. d'eau à la température 0; par l'arrivée de la vapeur, son poids augmente et sa température s'élève; enfin, après un certain temps, son poids est augmenté de 100 grammes, et sa température élevée de 100°. Ces 100 grammes de vapeur condensée se retrouvant à 100° comme avant la condensation, il est évident qu'ils n'ont perdu que leur calorique d'élasticité. Donc enfin le calorique d'élasticité contenu dans 100 grammes de vapeur à 100° et sous la pression de 760°, est précisément capable d'élever 550 grammes d'eau de 0 à 100°. Un seul gramme de vapeur, dans les mêmes circonstances, ne produirait que la centième partie de cet effet, c'est-à-dire

qu'en se condensant, il éleverait de 1° la température de 550$^{gr.}$ d'eau. Ce résultat est en effet le nombre qu'on adopte en général, d'après les expériences de MM. Gay-Lussac, confirmées un peu plus tard par celles de MM. Clément et Desormes. Rumford avait trouvé 567 au lieu de 550, et M. Despretz trouve 530 ou 540 seulement. Une des principales causes d'erreur dans ces expériences est la quantité d'eau liquide que la vapeur entraîne avec elle lorsqu'elle vient se condenser dans la masse d'eau froide.

Pour simplifier les raisonnemens on a coutume, en parlant d'un poids donné de vapeur, de prendre pour unité de calorique la quantité de chaleur qui est nécessaire pour élever de 1° la température d'un poids égal d'eau liquide. Ainsi, de l'eau à 100° absorbe en se vaporisant 550 unités de chaleur; de l'eau à 0 en prendrait 650, savoir : 100 pour passer de 0 à 100°, en restant liquide, et 550 pour se transformer en vapeur sans changer de température.

Une question très-importante sur la vapeur d'eau est la question de savoir si les quantités de chaleur qu'elle absorbe pour se former sont indépendantes des températures auxquelles elle se forme; si, par exemple, 1 gramme d'eau prend autant de chaleur pour se vaporiser à 0 que pour se vaporiser à 100 ou à 150°. Beaucoup de recherches ont été faites sur ce point, et toutes s'accordent à établir ce principe fondamental : *que dans un gramme de vapeur au maximum de force élastique il y a toujours la même quantité de chaleur, quelle que soit la température.* Ainsi 1 gramme d'eau étant pris à 0, la somme des quantités de chaleur qu'il faudra lui donner pour l'élever à 140°, et ensuite pour le vaporiser à cette température sous la pression maximum de 3,500^{mm}, sera sensiblement la même que la somme des quantités de chaleur qu'il aurait fallu lui donner pour l'élever à 100° et le vaporiser à cette température sous la pression maximum de 760^{mm}, ou pour l'élever à 10° et le vaporiser à cette température sous la pression maximum

de $9^{mm},475$, ou enfin pour le vaporiser directement à 0 sous la pression maximum de $5^{mm},059$. Cette vérité semble moins étonnante lorsqu'on prend garde à la prodigieuse différence de volume que prend la vapeur dans ces différens cas: à 0, par exemple, 1 gramme de vapeur occupe un espace de 150,000 centimètres cubes, et à 150°, un espace seulement de 332 centimètres cubes. Réciproquement 1 gramme de vapeur au maximum de force élastique étant pris à une température quelconque, puis condensé et ensuite réduit à 0, dégagera toujours la même quantité de calorique, c'est-à-dire 650 unités.

Nous indiquerons ici quelques questions qui peuvent être résolues par ces principes.

On a 100 litres d'eau à 0; quel poids de vapeur faut-il y condenser pour que le mélange soit à 30°?

Dans 100 litres d'eau à 30° on remplace 10 litres d'eau chaude par 10 litres d'eau froide à 10°: combien faut-il y condenser de vapeur pour que la température soit ramenée à 30°?

Dans une masse d'eau qui est maintenue à 50°, on fait entrer de la vapeur à 100°, ayant une tension de 760^{mm}; cette vapeur traverse un serpentin, où elle se condense en partie; ce qui ne se condense pas sort à la température de 50°, avec la tension maximum de 89^{mm}; on demande quel est le rapport entre la vapeur qui se condense et celle qui s'échappe, et quelle est la quantité de chaleur dégagée par chaque gramme de vapeur qui entre.

270. *Calorique d'élasticité de diverses vapeurs.* — M. Despretz a fait quelques expériences pour déterminer le calorique d'élasticité des vapeurs d'alcool, d'éther sulfurique et d'essence de térébenthine.

Le résultat de ses recherches est le suivant:

Alcool.	207,7
Éther sulfurique. . . .	96,8
Essence.	76,8

C'est-à-dire que 1 gramme d'alcool en se condensant à la température de 78°,8 qui est celle de l'ébullition, abandonne assez de chaleur pour élever de 1° la température de 207,7 grammes d'eau; l'éther sulfurique ne pourrait élever de 1° que 90gr.,8 et l'essence de térébenthine 76gr.,8. Le point d'ébullition de l'éther est 35°,5; celui de l'essence 156,8. On voit que le calorique d'élasticité est moindre pour les vapeurs dont la densité est plus grande; mais il n'est pas en raison inverse des densités.

CHAPITRE III.

De la Chaleur de combinaison et de la Chaleur animale.

271. Toute combinaison chimique dégage de la chaleur ou du froid. Cette vérité générale est établie sur l'ensemble des faits que la chimie a pu recueillir, soit dans la nature inorganique, soit dans le développement de la végétation, soit dans l'accroissement des corps vivans et dans le renouvellement continuel de leur substance pondérable. Toutes ces quantités de chaleur dégagées ou absorbées, tantôt par l'intime union des élémens matériels, tantôt par leur ségrégation, peuvent être comparées et mesurées comme les chaleurs spécifiques ou les chaleurs latentes.

Nous nous contenterons d'indiquer ici les méthodes par lesquelles on détermine la chaleur développée par la combustion, et la chaleur développée par la respiration des animaux.

272. *Chaleur produite par la combustion.* — Pour mesurer la quantité de chaleur dégagée par la cire d'abeille, par exemple, on pèse une bougie, on l'allume et on la laisse brûler paisiblement sous la bouche du serpentin du calorimètre de Rumford (*Fig.* 216). Les produits de la combustion s'élèvent rapidement, parcourent les circonvolutions du serpentin, y déposent l'excès de leur chaleur, et sortent à la température de l'eau du calorimètre. Au commencement de l'expérience la température de l'appareil est à 5 ou 6° au dessous de la température ambiante, et à la fin

elle est à 5 ou 6° au dessus; par cette précaution on est dispensé de tenir compte de la chaleur gagnée ou perdue à l'extérieur.

Connaissant le poids du calorimètre lui-même et la capacité du cuivre dont il est fait; connaissant le poids de l'eau qu'il contient et la température à laquelle elle s'élève; connaissant enfin le poids de la cire brûlée, on peut déterminer, par le calcul et en faisant les corrections convenables, toute la quantité de chaleur que dégage 1 gramme de cire en brûlant dans l'air. On trouve ainsi que 1gr. de cire produit assez de chaleur pour élever de 1° un poids d'eau liquide d'environ 10,000gr.; on a coutume d'exprimer ce résultat d'une autre manière, en disant qu'il produit assez de chaleur pour élever de 10,000° la température de 1gr. d'eau. Le premier énoncé représente une réalité, le second est tout-à fait conventionnel; car on ne sait ce que c'est qu'une température de 10,000°.

Le même procédé s'applique à la combustion des autres substances, mais dans tous les cas il a l'inconvénient de laisser échapper une grande partie de la chaleur rayonnante, qui traverse l'air ambiant sans être recueillie dans l'appareil.

MM. Lavoisier et de Laplace faisaient brûler les corps dans la chambre intérieure de leur calorimètre; mais il y a aussi quelque inconvénient à cette méthode, parce qu'il faut renouveler l'air qui alimente la combustion, et tenir compte des effets qu'il peut produire.

M. Despretz a aussi fait quelques expériences par une autre méthode.

Voici un tableau des résultats qui ont été obtenus. La lettre R indique les nombres de Rumford, les lettres LL ceux de MM. Lavoisier et de Laplace, et la lettre D ceux de M. Despretz.

Tableau des quantités de chaleur dégagées par la combustion de diverses substances.

DÉSIGNATION DES SUBSTANCES.	ÉLÉVATION DE TEMPÉRATURE que 1 gr. de chaque substance en se brûlant avec l'oxigène communiquerait à 1 gr. d'eau.	ÉLÉVATION DE TEMPÉRATURE que 1 gr. d'oxigène en brûlant chaque substance, communiquerait à 1 gr. d'eau.
Fer.	» D.	5325
Hydrogène.	23400° LL.	2910
Idem.	» D.	2578
Huile d'olive.	11166 LL.	3696
Idem.	9044 R.	2993
Cire blanche.	10500 LL.	3355
Idem.	9479 R.	3029
Huile de colza épurée. . . .	9307 R.	»
Suif.	8369 R.	»
Idem.	7186 LL.	»
Éther sulfurique	8030 R.	3136
Phosphore.	7500 LL.	5885
Charbon.	7226 LL.	2722
Idem.	» D.	2967
Naphte.	7338 R.	»
Alcool à 42° Beaumé. . . .	6195 R.	3019
Idem, plus aqueux.	5422 R.	»
Idem, à 33°.	5261 R.	»
Bois très-sec.	4314 R.	3093

273. *De la chaleur animale.* — Les corps organisés semblent se soustraire aux lois générales de la chaleur, car ils ne sont presque jamais à la température des milieux dans lesquels ils vivent. Le corps humain n'est point à la température de l'air qui l'environne : les animaux des régions polaires sont plus chauds que la glace sur laquelle ils reposent; ceux des régions équatoriales plus froids que l'air brûlant qu'ils respirent; les oiseaux ne sont point à la température de l'atmosphère, ni les poissons à la température de l'eau où ils sont plongés. Il y a donc dans les corps organisés quelque chaleur propre, ou plutôt quelque moyen

de produire, suivant le besoin, de la chaleur ou du froid; car la matière pondérable qui les compose doit nécessairement, comme matière pondérable, être soumise aux lois générales de l'équilibre de température. Cette question fondamentale de la chaleur des corps vivans se réduit à trois points essentiels que nous allons successivement examiner : 1°. quelle est leur température ? 2°. quelles sont les quantités de chaleur qu'ils peuvent produire dans un temps donné? 3°. par quels moyens ces quantités de chaleur peuvent-elles être produites?

274. *De la température du corps humain.* — La température intérieure paraît être la même dans les différens organes, et elle paraît être la même aussi que celle qu'on obtient en plaçant un petit thermomètre sous la langue, et en tenant la bouche exactement fermée pendant tout le temps que le thermomètre éprouve des variations. Cette température est de 37°; l'état de santé et de maladie, l'âge et le climat n'y peuvent produire que de légères différences. M. John Davy a fait sur ce point des observations curieuses dans le cours de ses voyages, et surtout dans une traversée des ports de l'Angleterre à l'île de Ceylan. En prenant à diverses latitudes la température de plusieurs hommes de l'équipage, il a reconnu qu'elle s'accroît en arrivant dans les pays chauds; cet accroissement toutefois est assez faible; car il ne s'élève qu'à 1° environ. En même temps M. John Davy a pris des températures sur des naturels de Ceylan, sur des Hottentots, sur des nègres de Madagascar et de Mozambique, sur des Albinos, sur des Malais, sur des Cipayes, sur des prêtres de Boudha, qui ne mangent que des légumes, et sur des Vaida, qui ne mangent que de la viande. Toutes ces températures sont très-peu différentes; la plus basse de toutes est de 35,8; elle appartient à deux Hottentots du cap de Bonne-Espérance: la plus élevée se trouve de 38,9; elle appartient à deux enfans d'Européens, nés à Colombo, l'un de huit ans et l'autre de douze.

755. *Température des animaux.* — M. John Davy a fait encore sur ce point la série d'observations la plus complète qui nous soit connue, et sans doute aussi la plus exacte. Voici le tableau de ses résultats,

Tableau des températures de divers animaux, observées par M. John Davy.

NOM DE L'ANIMAL.	SA TEMPÉR. EN DEGRÉS CENTIGR.	TEMPÉRATURE AMBIANTE.	LIEU DE L'OBSERVATION.
	Mammifères.		
Singe	+ 39°,7	+30°	Colombo.
Pangolin	26,7	27	*Idem.*
Chauve-souris	37,8	28	*Idem.*
Idem	38,3	28	*Idem.*
V. vampirus	37,8	21	*Idem.*
Écureuil	38,8	27	*Idem.*
Rat commun	38,8	26,5	*Idem.*
Lièvre commun	37,8	26,5	*Idem.*
Ichneumon	39,4	27	*Idem.*
Tigre	37,2	26,5	*Idem.*
Chien	39,0	»	Kandy.
Idem	39,6	»	*Idem.*
Jackal	38,3	29	Colombo.
Chat commun	38,3	15	Londres.
Idem	38,9	26	Kandy.
Panthère	38,9	27	Colombo.
Cheval (race arabe)	37,5	26	Kandy.
Mouton	39,3 à 40,0	En été.	Écosse.
Idem	39,5 à 40,0	19	Cap de Bonne-Espér.
Idem	40,0 à 40,5	26	Colombo.
Bouc	39,5	26	*Idem.*
Chèvre	40,0	26	*Idem.*
Bœuf	38,9	En été.	Edimbourg.
Idem	38,9	26	Kandy.
Élan femelle	39,4	25,6	Colombo.
Porc	40,5	25,6	Dans le Doombera.
Éléphant	37,5	26,7	Colombo.
Marsouin	37,8	23,7	En mer ; lat. 8° 23' N.
	Oiseaux.		
Milan	37,2	25,3	Colombo.
Cat-huant	40,0	15,6	Londres.
Perroquet	41,1	24	Kandy.
Choucas	42,1	31,5	Ceylan.
Grive commune	42,8	15,5	Londres.
Moineau commun	42,1	26,6	Kandy.
Pigeon commun	42,1	15,5	Londres.
Idem.	43,0	25,5	Colombo.

NOM DE L'ANIMAL.	SA TEMPÉR. EN DEGRÉS CENTIGR.	TEMPÉRATURE AMBIANTE.	LIEU DE L'OBSERVATION.
Pigeon commun. . .	43,3	25,5	Colombo.
Poule de Jungles. .	42,0	25,5	Ceylan.
Idem.	42,5	25,5	*Idem*.
Poule commune. . .	42,5	4,5	Édimbourg.
Idem.	43,3	25,5	Colombo.
Idem.	42,2	25,5	*Idem*.
Coq vieux.	43,3	25,5	*Idem*.
Coq adulte.	43,9	25,5	*Idem*.
Poule de Guinée. .	43,9	25,5	Près de Colombo.
Coq d'Inde.	42,7	25,5	*Idem*.
Pétrel	40,3	26	En mer; lat. 2° 3' N.
P. Capensis.	40,8	15	*Idem*; lat. 34° S.
Oie commune. . . .	41,7	25,5	Près de Colombo.
Canard commun . .	43,9	25,5	*Idem*.
Amphibies.			
Tortue.	28,9	26	En mer; lat. 2° 27' N.
Idem.	29,4	32	Colombo.
T. Geometrica. . . .	16,9	16	Cap de Bonne-Espér.
Idem.	30,5	26,6	Colombo.
Rana Ventricosa. . .	25,0	26,7	Kandy.
Iguana.	29,0	27,8	Colombo.
Serpent	31,4	27,5	*Idem*.
Idem	29,2	28,1	*Idem*.
Idem.	32,2	28,3	*Idem*.
Poissons.			
Requin.	25,0	23,7	En mer; lat. 8° 23' N.
Bonite, au cœur. . .	27,8	27,2	*Idem*, lat. 1° 14' S.
— dans les musc. intér.	37,2	27,2	*Idem*.
Truite commune. . .	14,4	13,3	Près Édimbourg.
Poisson volant. . . .	25,5	25,3	En mer; lat. 6° 57' N.
Mollusques.			
Huitre commune . .	27,8	27,8	Près de Colombo.
Limaçon.	24,6	»	Kandy.
Crustacés.			
Écrevisse	26,1	26,7	Colombo.
Crabe	22,2	22,2	Environs de Kandy.
Insectes.			
Scarabée.	5,0	24,3	Kandy.
Ver-luisant.	23,3	22,8	*Idem*.
Blatta orientalis. . .	23,9	28,3	*Idem*.
Idem	23,9	23,3	*Idem*.
Grillon.	22,5	16,7	Cap de Bonne Espér.
Guêpe.	24,4	23,9	Kandy.
Scorpion.	25,3	26,1	*Idem*.
Julus.	25,8	26,6	*Idem*.

Remarques. — Pour les amphibies, le nombre qui se trouve dans la colonne de la *température ambiante*, est la température de l'air; pour les poissons, l'huître commune et le crabe, c'est la température de la mer.

On voit que les oiseaux sont de tous les animaux ceux dont la température est la plus élevée; les mammifères occupent le second rang; viennent ensuite les amphibies, les poissons et certains insectes; la dernière classe comprend les mollusques et les crustacés, qui sont sensiblement à la température ambiante, ainsi que les vers sur lesquels on a jusqu'à présent fait des expériences.

La bonite offre un exemple remarquable : la mer étant à 27,2, la température de la bonite s'est trouvée de 27°,8 au cœur, et de 37,2 dans les muscles intérieurs; le cœur est très-près de la surface.

276. *Quantités de chaleur produites par divers animaux.* — Ces quantités de chaleur peuvent être déterminées par le calorimètre, et MM. Lavoisier et de La Place n'avaient pas manqué d'appliquer leur instrument à ce genre de recherches. Dernièrement M. Dulong a employé un autre moyen, qui est sans doute le plus précis et le plus ingénieux que l'on puisse imaginer, son beau travail sur ce sujet n'est point encore publié, et nous ne pourrons donner ici qu'une idée générale de son appareil et de ses résultats. L'animal que l'on soumet à l'épreuve est enfermé, fort à son aise, dans une caisse en cuivre mince, qui est plongée dans une grande masse d'eau; l'air nécessaire à la respiration lui est fourni par un gazomètre; les produits de la respiration sont conduits au dehors; ils sortent à la température de la masse d'eau; ils sont recueillis et analysés. L'expérience dure environ deux heures, et par l'élévation de température de l'eau, on juge, après avoir fait toutes les corrections, quelle est la quantité de chaleur qui a été fournie par l'animal en expérience. M. Dulong a déterminé ces quantités de chaleur avec une grande précision, sur des individus de différentes

espèces, jeunes ou adultes, carnivores ou frugivores. Ces animaux n'ayant à souffrir ni gêne ni fatigue, on conçoit que, s'ils perdent de la chaleur à chaque instant, il faut qu'à chaque instant ils en reproduisent une égale quantité, et nous allons voir par quels moyens.

277. *Causes principales de la chaleur des animaux.* — L'air qui a servi à la respiration est altéré comme l'air qui a servi à la combustion. L'oxigène s'est en partie combiné avec du carbone, pour former de l'acide carbonique; donc il se fait dans les poumons une véritable combustion. Quand Lavoisier eut fait cette découverte, la chaleur animale ne fut plus un mystère : on en vit la source dans le phénomène de la respiration. Cependant il faut mesurer cette source et savoir si, à elle seule, elle compense exactement les pertes; c'est ce qu'a fait M. Dulong. Après avoir déterminé, comme nous venons de le voir, la quantité de chaleur perdue par un animal dans un temps donné, il a cherché la quantité de chaleur produite par la respiration. L'air qui est fourni à l'animal est mesuré par le gazomètre; les altérations qu'il éprouve sont données par l'analyse. Voici quelles elles sont : 1° Il sort plus humide; 2° une partie de l'oxigène est remplacée par de l'acide carbonique; 3° une autre portion de l'oxigène disparaît; 4° l'azote n'éprouve que de faibles variations. Admettant que l'oxigène qui est passé à l'état d'acide carbonique s'est réellement combiné avec du carbone pendant l'inspiration, ou après avoir été absorbé, on peut calculer la quantité de chaleur qui en résulte. Admettant ensuite que la quantité d'oxigène qui a disparu s'est combinée avec de l'hydrogène pour former de l'eau, on peut pareillement calculer la quantité de chaleur qui en résulte. La somme de ces deux quantités de chaleur représente certainement toute la chaleur que la respiration peut produire; or, cette somme représente, dans certains cas, les $\frac{9}{10}$ de la chaleur perdue par l'animal, et dans d'autres cas, les $\frac{8}{10}$ seulement. Tel

est le résultat curieux auquel M. Dulong a été conduit. Il paraît donc qu'il y a dans les animaux, outre la respiration, quelque autre source de chaleur. Il reste à savoir si elle se trouve dans les sécrétions diverses qui se font à chaque instant, ou si elle est plus cachée et dépendante de l'action plus ou moins énergique du système nerveux.

CHAPITRE IV.

Des sources de chaleur et de froid.

278. *De la chaleur des gaz soumis à des actions mécaniques.* — Tous les gaz dégagent de la chaleur par la compression. L'expérience en peut être faite au moyen d'un appareil semblable au briquet à air (*Fig.* 1.). Le gaz que presse le piston étant de l'air atmosphérique, ou de l'oxigène, tout le monde sait qu'une vive pression dégage assez de chaleur pour enflammer de l'amadou. Les autres gaz ne produisent pas l'inflammation parce qu'ils ne sont pas des corps *comburens*, mais tous s'échauffent, et trois d'entre eux, l'air, l'oxigène et le chlore, par une compression forte et subite s'échauffent assez pour devenir lumineux dans les ténèbres. On avait admis ce résultat comme une propriété caractéristique des gaz dont il s'agit; mais M. Thenard a démontré dernièrement, par une série d'expériences curieuses, que ces gaz ne deviennent lumineux que parce qu'ils se combinent avec la graisse du piston, ou avec quelques autres corps étrangers. (*Ann. de chim. et de phys.*, tom. XLIV, pag. 181.)

Réciproquement tous les gaz produisent du froid par l'expansion. Pour s'en assurer, on suspend un thermomètre au milieu d'une cloche ou d'un ballon dont on aspire l'air par la machine pneumatique. Dès le premier coup de piston, le thermomètre descend; s'il a peu de masse et une grande sensibilité, on peut le faire descendre ainsi à 8 ou 10° au dessous de la température ambiante. Les autres gaz produisent des effets analogues.

Il paraît que ce double effet se produit dans les appareils à gaz portatif pour l'éclairage; ces appareils sont de forts cylindres, de deux ou trois pieds de long, terminés aux deux bouts par des hémisphères; lorsqu'on les met en communication avec le gazomètre pour les remplir sous une trentaine d'atmosphères, on observe un abaissement de température à l'extrémité par laquelle entre le gaz, et une élévation de température à l'extrémité opposée.

Ces deux phénomènes de production et d'absorption de chaleur s'expliquent d'une manière satisfaisante par les changemens de capacité qui accompagnent dans les gaz les changemens de densité. En supposant que la compression ou l'expansion se fasse dans un vase imperméable à la chaleur, M. Poisson arrive à la formule suivante pour exprimer les variations de température qui correspondent aux variations de volume :

$$x = (266°,67 + t)\left(\frac{d'}{d}\right)^{k-1} - 269°,67.$$

t est la température primitive du gaz;

d sa densité primitive;

d' sa densité après la compression ou l'expansion;

x sa température correspondante à la densité d';

k le rapport de sa capacité sous une pression constante, à sa capacité sous un volume constant (264); pour l'air, sa valeur est 1,375.

M. Gay-Lussac a observé, sur la chaleur des gaz, deux autres phénomènes qui sont plus difficiles à expliquer.

1°. L'air qui s'échappe d'un vase en soufflant par une ouverture, sous une pression quelconque, ne change pas de température, quoiqu'il se dilate en sortant du vase;

2°. Le vide étant fait dans un ballon, ou l'air étant seulement raréfié, la rentrée de l'air extérieur produit une élévation de température de plusieurs degrés.

Le premier de ces faits mérite toute l'attention des phy-

siciens; il semble indiquer qu'il y a de la chaleur produite dans le souffle de l'air, et que cette chaleur est d'autant plus considérable que la différence de pression qui produit le souffle est plus grande, de telle manière que le réchauffement compense exactement le froid produit par l'expansion. Ainsi le second fait s'expliquerait par le premier.

Quelques physiciens avaient pensé que, si l'air s'échauffe en rentrant dans le vide, c'est que le vide est rempli de chaleur, non-seulement de chaleur rayonnante, mais encore d'une chaleur particulière et inhérente que l'air s'approprie lorsqu'il vient remplir l'espace. Cette conjecture semble tout-à-fait détruite par une belle expérience de M. Gay-Lussac. Si du calorique inhérent existait dans le vide, en réduisant l'espace subitement, la température du vide devrait augmenter, comme dans le cas où l'air y pénètre. Or, après avoir fait un baromètre à large colonne, dans la chambre duquel il met un thermomètre très-sensible, M. Gay-Lussac fait alternativement monter et descendre le mercure par un mouvement très-prompt, pour diminuer ou agrandir l'étendue du vide, et jamais ces changemens ne sont accompagnés des moindres variations de température.

278. *De la percussion.*—Tout le monde sait qu'un métal s'échauffe lorsqu'on le bat sur l'enclume, ou lorsqu'on le comprime par le choc du balancier. Il était curieux d'observer si ce dégagement de chaleur est accompagné d'une réduction de volume permanente; car si le corps, un instant refoulé sur lui-même, revenait à ses dimensions primitives, on ne verrait plus de raison à la production de la chaleur. Or, il résulte de quelques expériences de MM. Berthollet, Biot et Pictet, que le cuivre et l'argent, qui dégagent beaucoup de chaleur sous un premier coup de balancier, en dégagent moins sous le second coup, et moins encore sous le troisième. Enfin, quand ils sont tellement écrouis que leurs molécules ne puissent plus se rapprocher

davantage d'une manière permanente, les chocs les plus violens ne produisent plus d'élévation de température. A ce point de condensation, ils sont analogues aux liquides; sans doute ils peuvent bien encore être comprimés, mais ils reviennent à l'instant; et la chaleur qu'ils dégagent dans cette compression instantanée est égale à celle qu'ils absorbent dans l'expansion qui la suit.

279. *Du frottement.* — Les métaux, le bois et tous les corps solides dégagent de la chaleur par le frottement : une roue prend feu lorsqu'elle tourne rapidement sur son essieu; les tourillons des rouets, dans les machines à rotation, s'échauffent au point d'enflammer leurs supports; le bois lui-même s'allume en frottant sur du bois, et ce moyen de produire du feu est, comme on sait, le seul briquet des sauvages; deux morceaux de glace au dessous de 0, frottés vivement, donnent assez de chaleur pour se fondre à leur surface. Tous ces phénomènes donnent lieu à une question importante, savoir : si les dégagemens de chaleur qu'on observe dans le frottement résultent d'une compression permanente des corps frottés, ou si le mouvement de vibration imprimé à leurs molécules n'est pas lui-même une cause de chaleur. Il est difficile de faire sur ce point des expériences décisives. Cependant, les quantités de chaleur produites par le frottement et par la ségrégation des molécules sont souvent si considérables, que nous devons, avec Rumfort et plusieurs physiciens, en attribuer au moins une partie aux mouvemens de vibration des molécules frottées. Parmi toutes les expériences qui favorisent cette opinion, nous nous contenterons de citer les suivantes.

Un alliage composé d'une partie de fer et de deux d'antimoine donne, sous la lime, de vives étincelles de feu; ainsi, les parcelles de limaille sont, par le frottement, portées à la température de la combustion. Dans le jeu du briquet ordinaire, les aspérités tranchantes du silex tracent

un sillon dans l'acier, et en détachent des parcelles qui sont pareillement assez échauffées pour s'enflammer dans l'air, et pour tomber en globules arrondis par la fusion, et en partie brûlés. Au fond d'un canon de bronze, tourné verticalement et rempli d'eau, Rumford a fait jouer un foret très-vivement et sous une grande pression; dans l'espace de deux heures, 4145 grains (poids anglais) de bronze ont été réduits en poudre, et la chaleur dégagée a été capable de faire passer 26 livres d'eau de 0 à 100°. Cette chaleur ne provenait pas sans doute d'un changement de densité dans la masse de bronze, ou dans la limaille détachée, car cette limaille avait sensiblement la même capacité pour la chaleur que le bronze en masse.

280. *Des changemens d'état.* — Nous avons vu que les changemens d'état des corps donnent naissance à des absorptions et à des dégagemens de chaleur dont il est facile d'avoir les mesures exactes; mais on éprouve de grandes difficultés lorsqu'on essaie d'expliquer ces phénomènes par les différentes capacités pour la chaleur que prennent les corps dans les divers états, de solide, de liquide ou de vapeur.

281. *Des actions moléculaires.* — Tout corps solide dégage de la chaleur à l'instant où il est *mouillé* par un liquide. Cette vérité générale résulte d'une série d'expériences que j'ai faites en 1822. Les liquides étaient l'eau, l'huile, l'alcool et l'éther acétique; les solides appartenaient au règne inorganique et au règne organique; ils avaient été réduits en poudre pour que l'effet fût plus sensible. Dans la multitude de ceux qui ont été essayés, il ne s'en est pas présenté un seul qui fît exception à la loi. Le plus souvent l'élévation de température n'était que de $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{5}$ de degré; quelquefois elle s'élevait jusqu'à 10°. L'action moléculaire qui s'exerce dans ces circonstances, entre le solide et le liquide, n'est point une action chimique; elle ne s'exerce à la fois que sur une très-faible partie de la masse,

et l'on voit cependant quelle quantité de chaleur elle dégage ; il faut bien que les molécules qui sont en jeu pour produire cette action se trouvent elles-mêmes à des températures très-hautes. Ces effets sont, il me semble, la plus forte preuve que les vibrations moléculaires dégagent de la chaleur.

282. *De l'ignition spontanée.* — Nous appellerons ainsi le phénomène curieux découvert par Dœbereiner, en 1823. Ce phénomène est le suivant : du platine, en fil très-fin, en poudre, en feuille, ou en *éponge*, étant à la température ordinaire, si on le plonge dans un mélange d'hydrogène et d'air, pareillement à la température ordinaire, il suffit d'un instant pour qu'il y ait une vive ignition. Le platine devient chaud, rouge, rouge-blanc ; l'hydrogène brûle, et la combustion continue tant qu'il y a des élémens combustibles en présence. Quelle est la cause qui détermine d'abord l'élévation de température ? Les physiciens et les chimistes ont émis sur ce point des opinions très-diverses ; celle qui me semble le plus probable, c'est que le mélange gazeux exerce sur le métal divisé une action pareille à celle des liquides sur les corps qu'ils mouillent ; que cette *action moléculaire* produit, aux points où elle s'exerce, une assez haute chaleur pour déterminer la combinaison de l'hydrogène avec l'oxigène, et que, la combustion une fois commencée, elle se continue d'elle-même par la chaleur qu'elle produit.

On fait ces expériences d'une manière commode avec la lampe de M. Gay-Lussac (*Fig.* 155) ; il suffit de présenter au courant d'hydrogène quelques fragmens de platine divisé, et sans étincelle électrique on voit jaillir la flamme.

MM. Dulong et Thenard ont fait sur ce sujet de nombreuses expériences, desquelles il résulte :

1°. Que le palladium, le rhodium et l'irridium se comportent comme le platine.

2°. Que l'osmium agit aussi, mais à 45°, et l'or à 120.

3°. Que le charbon, le verre, la pierre ponce et la porcelaine agissent pareillement, mais à des températures voisines de 250°.

4°. Que tous ces corps perdent la propriété dont il s'agit par un trop long séjour dans l'air, mais qu'il suffit de les calciner pour la leur rendre.

283. *Des combinaisons.* — Les combinaisons chimiques sont, à la surface de la terre, la source la plus abondante de chaleur. Nous avons vu (271) comment on mesure les quantités qu'elles en fournissent; mais la cause elle-même qui produit ces effets n'est pas aussi facile à découvrir. On a supposé long-temps que la chaleur dégagée ou absorbée dans les combinaisons provenait du changement d'état des élémens constituans, ou du rapport entre leurs capacités, pour la chaleur et la capacité du composé; mais ni les changemens d'état, ni les variations de capacité ne peuvent rendre compte des faits, et ce point est peut-être, dans toute la théorie de la chaleur des combinaisons, le seul qui soit bien établi.

284. *Des mélanges réfrigérans.* — Nous avons indiqué d'une manière générale (223) la cause du froid produit par les mélanges réfrigérans. Comme on peut avoir besoin de s'en servir dans une foule d'expériences, nous donnerons ici un tableau de ces mélanges, tiré de la Chimie de M. Thenard.

Tableau des mélanges réfrigérans.

MÉLANGES DE NEIGE ET DE SEL, OU D'ACIDE ÉTENDU D'ALCALI		ABAISSEMENT DU THERMOMÈTRE.
Neige	1	de 0° à — 17,77
Sel marin	1	
Hydro-chlorate de chaux	3	de 0 à — 27,77
Neige	2	
Potasse	4	de 0 à — 28,33
Neige	3	
Neige	1	de — 6,66 à — 51
Acide sulfurique étendu	1	
Neige ou glace pilée	2	de — 17,77 à — 20,55
Sel marin	1	
Neige et acide nitrique étendu		de — 17,77 à — 43,33
Hydro-chlorate de chaux	2	de — 17,77 à — 54,44
Neige	1	
Neige ou glace pilée	1	de — 20,55 à — 27,77
Sel marin	5	
Hydro-chlorate d'ammoniaque et nitrate de potasse	5	
Neige	2	de — 23,33 à — 48,88
Acide sulfurique étendu	1	
Acide nitrique étendu	1	
Neige ou glace pilée	12	de — 27,77 à — 31,66
Sel marin	5	
Nitrate d'ammoniaque	5	
Hydro-chlorate de chaux	3	de — 40 à — 58,33
Neige	1	
Acide sulfurique étendu	10	de — 55,55 à — 68,33
Neige	8	

285. Pour compléter l'énumération des sources de chaleur, nous devons indiquer encore la chaleur produite par l'électricité, et celle qui est produite par la lumière solaire; nous parlerons de la première dans le livre suivant, et de la seconde dans la Météorologie.

APPENDICE.

CONSTRUCTION DES MACHINES A VAPEUR.

286. *Formation de la vapeur.* — La *figure* 229 représente une chaudière à vapeur sur son fourneau ; le feu en frappe le fond et les faces latérales, dans la plus grande hauteur possible ; car la quantité de vapeur produite dans un temps donné est proportionnelle à l'étendue de la chaudière qui est immédiatement chauffée.

D est le tuyau par lequel s'échappe la vapeur pour aller produire son effet mécanique, comme nous le verrons plus loin.

E est la soupape du *modérateur* ; elle s'ouvre ou se ferme au moyen d'une tige extérieure, et modère la dépense.

La vapeur se formant sans cesse, il faut que l'eau arrive sans cesse dans la chaudière, et elle arrive d'elle-même par la disposition suivante :

i i est un flotteur ; c'est une large pierre qui est soutenue à la surface de l'eau.

J J est le fil de métal qui soutient le flotteur ; il sort de la chaudière par l'ouverture J qu'il remplit exactement, mais dans laquelle il peut glisser.

K K′ est un levier ; à son extrémité K vient s'attacher le fil du flotteur, et à son extrémité K′ s'attache la tige de la soupape M.

M, soupape qui se lève quand le flotteur descend, et qui se ferme quand il remonte.

H H, réservoir alimentaire. Quand la soupape M se lève, l'eau de ce réservoir descend dans le tuyau I I.

I I, tuyau alimentaire qui amène l'eau du réservoir jusqu'au fond de la chaudière.

O, cylindre de fer en forme de seau, soutenu par la chaîne P P qui passe sur deux poulies, et qui s'attache à un *registre*.

Si la pression de la vapeur est trop forte, elle refoule l'eau de la chaudière dans le tuyau alimentaire I I, le seau de fer O est soulevé, et le registre descend pour fermer plus ou moins l'ouverture de la cheminée, et modérer ainsi l'activité du feu.

S est une soupape de sûreté; quand elle est soulevée par un excès de pression, la vapeur qu'elle dégage passe dans la cheminée par un tuyau latéral.

F F sont deux robinets d'épreuve.

B C est le manomètre qui marque la tension de la vapeur; on le voit plus en grand au dessus de la place qu'il occupe dans la figure 229.

C' est le *trou de l'homme*; c'est une ouverture par laquelle les ouvriers descendent dans la chaudière pour la réparer ou pour la nettoyer.

V est un robinet pour vider la chaudière.

Il y a des chaudières d'une tout autre forme. Les figures 230 et 231 représentent la chaudière qu'on appelle le *bouilleur*, de Wolf; elle se compose de huit cylindres en fonte (*Fig.* 231) disposés horizontalement et *en croix* au-dessous d'un grand cylindre horizontal A A (*Fig.* 230) auquel ils communiquent par des tubes verticaux. Le foyer est en B, et la flamme passe alternativement au dessous d'un tuyau et au dessus du suivant; de cette manière on a une très-grande surface en contact avec le feu. La vapeur formée dans les bouilleurs s'élève pour aller produire son effet mécanique; et une pompe foulante refoule sans cesse de l'eau pour la remplacer.

287. *Action de la vapeur.* — La figure 238 représente une machine de Watt. La vapeur, formée comme nous

venons de le dire, s'échappe de la chaudière par le modérateur, et vient se répandre dans le corps de pompe c c, pour produire son effet mécanique sur le piston p'. La vapeur arrive, agit et se détruit; et tous ces phénomènes se produisent d'eux-mêmes avec une régularité merveilleuse que nous allons essayer de faire comprendre.

p' est le piston. On voit dans la figure 232 le détail de sa construction. Les figures 233, 234 et 235 représentent des pistons de différentes espèces.

t, tige de piston.

c c, cylindre ou corps de pompe, parfaitement *rodé*, dont le piston parcourt toute la longueur, alternativement, de haut en bas et de bas en haut. Il y a deux ouvertures *u* et *v* par chacune desquelles la vapeur peut entrer et sortir.

c' c', autre cylindre que nous appellerons *enveloppe*, parce qu'il enveloppe en effet le cylindre c c; il reste entre eux un espace annulaire dont on voit la largeur dans la figure; c'est là que la vapeur arrive directement en sortant de la chaudière. Il n'y a point de communication immédiate entre l'espace annulaire et le cylindre c c. (*Voyez* le plan, *Fig*, 239.)

T est le *tiroir*, qui est représenté plus en grand dans les figures 236 et 237. On en voit le plan en T, *Fig.* 239. C'est un demi-cylindre vertical qui peut monter et descendre. Dans la figure 236, il est au dessus de sa course, et il est au bas dans la figure 237. Il y a dans le tiroir des appendices en D'' et en D', *Fig.* 237, qu'il est important de considérer. Quand D' est au dessous de l'ouverture *u Fig.* 237, D'' est au dessous de l'ouverture *v*; de même quand D' est au dessus de l'ouverture *u*, D'' est aussi au dessus de l'ouverture *v*.

S. *Fig.* 236, 237, 238, est une soupape toujours ouverte; c'est un autre modérateur par lequel la vapeur sort de l'espace annulaire pour passer au dessus ou au dessous

du piston; au dessus, quand le tiroir est au dessus de sa course, *Fig.* 236, et au dessous quand il est au bas de sa course, *Fig.* 237.

K, *condenseur* où la vapeur arrive par les conduits v' et v'; l'eau échauffée par la condensation de la vapeur passe par la soupape E, et se trouve enlevée par la pompe d'épuisement *pp*.

Dans la position que représente la figure 238, le piston P' est en chemin pour descendre; le tiroir T est au dessus de sa course, comme dans la figure 236; la vapeur arrivée de la chaudière dans l'espace annulaire passe par la soupape S, entre par l'ouverture *u*, se répand dans le cylindre C C, et presse le piston pour le forcer à descendre, en même temps l'ouverture v est libre, l'espace qui est au dessous du piston communique au condenseur par les conduits v' et v'', et déjà toute la vapeur est condensée, et le piston peut descendre librement.

Quand le piston sera au bas de sa course, le tiroir descendra pour prendre la position de la figure 237; la communication sera fermée entre la soupape S et l'ouverture *u*; au contraire, elle sera établie entre la soupape S et l'ouverture v; ainsi, d'une part, la vapeur qui est au dessus du piston ira se liquéfier dans le condenseur, en passant de *u* en v' et v''; et, d'une autre part, la vapeur affluant par l'ouverture v fera, sans obstacle, remonter le piston jusqu'au dessus de sa course.

Voilà comment s'établit le jeu alternatif du piston; et les pièces de la machine sont combinées avec tant d'art et de génie que, l'impulsion une fois donnée, la main de l'homme peut se reposer; chaque levier se lève à son tour, à l'instant où il doit agir; et tous ces mouvemens, si nombreux, si variés, si compliqués, s'accomplissent d'eux-mêmes avec une admirable précision.

288. *Communication du mouvement.* — La force de la vapeur est maintenant dans la tige du piston; c'est là qu'il

faut la prendre pour la faire passer jusqu'au lieu où elle doit agir, soit à l'extrémité de la roue du bateau à vapeur, soit sur le grain de blé qui doit être moulu, soit dans les cylindres qui doivent laminer les métaux, soit aux instrumens tranchans qui doivent façonner le bois et faire des pièces de menuiserie, etc., etc.

MNOL est un rectangle dont les angles sont mobiles, et qui s'attache à l'extrémité L du levier LL′.

LL′, levier mobile autour de l'axe X.

F, bielle solide, qui s'attache à la manivelle G, et au moyen de laquelle l'axe Y, qu'on appelle *arbre de couche*, reçoit un mouvement de rotation.

VV, volant destiné à régulariser le mouvement.

Le mouvement alternatif du piston pressé par la vapeur se trouve ainsi transformé en un mouvement de rotation continu et uniforme, imprimé à l'arbre de couche; c'est là qu'on le prend ensuite pour le transmettre, par les moyens mécaniques ordinaires, jusqu'à la résistance qu'il doit vaincre.

FIN DE LA PREMIÈRE PARTIE
DES ÉLÉMENS DE PHYSIQUE ET DE MÉTÉOROLOGIE.

TABLE

DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LA PREMIÈRE PARTIE DU PREMIER VOLUME.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

CHAP. I. — Des Phénomènes naturels. — De l'Espace. — Du Temps. — De la Matière. — Des Forces. — Du Mouvement. — De l'Inertie. 1

CHAP. II. — *Propriétés générales des corps.* — Divisibilité. — Porosité. — Compressibilité. — Élasticité. — Dilatabilité. 16

CHAP. III. — *De l'Équilibre et du Mouvement.* 37

LIVRE PREMIER.

DE LA PESANTEUR.

CHAP. I. — Des Effets de la Pesanteur et de sa direction. . 58

CHAP. II. — De la Chute des Corps et des Lois de la Pesanteur. 65

CHAP. III. — Du Centre de Gravité. — De l'Équilibre des Solides. — De la Balance. — Du Poids, de la Masse et de la Densité des Corps. 75

CHAP. IV. — Du Pendule, et de la Figure de la Terre. . . 91

CHAP. V. — De l'Hydrostatique. 121

CHAP. VI. — De l'Équilibre des Gaz et des Pressions atmosphériques. 141

CHAP. VII. — De l'Équilibre des Corps flottans, et des Corps plongés dans les fluides. 182

CHAP. VIII. — Principes de l'Hydrodynamique et de l'Hydraulique. 192

CHAP. IX. — Du Mouvement des Gaz. 231

LIVRE DEUXIÈME.

DE LA CHALEUR.

Notions générales. 237

PREMIÈRE PARTIE.

Dilatation.

CHAP. I. — Construction du Thermomètre à mercure. . . . 247
CHAP. II. — Formules de Dilatation. 253
CHAP. III. — De la Dilatation des Gaz. 257
CHAP. IV. — De la Dilatation absolue du Mercure, et de la Dilatation apparente de quelques autres liquides. 265
CHAP. V. — De la Dilatation des Solides. 272
CHAP. VI. — De la Densité des Gaz, des Liquides et des Solides. 284
CHAP. VII. — Des Échelles thermométriques. — Des Thermomètres de différentes espèces, et des Pyromètres. 300

DEUXIÈME PARTIE.

Changement d'État des Corps.

CHAP. I. — De la Fusion et de la Solidification. 313
CHAP. II. — Des Vapeurs dans le vide. 322
CHAP. III. — Des Vapeurs mélangées avec les gaz. 347
CHAP. IV. — De l'Ébullition et de l'Évaporation. 352

TROISIÈME PARTIE.

De la Communication du Calorique.

CHAP. I. — De la Conducibilité. 369
CHAP. II. — Du Calorique rayonnant. 374
CHAP. III. — Des lois de Refroidissement. 388

QUATRIÈME PARTIE.

De la Mesure de la Chaleur, et des causes qui la produisent.

CHAP. I. — Calorique spécifique. 393
CHAP. II. — Calorique latent. 405
CHAP. III. — De la Chaleur de combinaison et de la Chaleur animale. 411
CHAP. IV. — Sources de Chaleur et de Froid. 420

APPENDICE.

Construction des Machines à vapeur. 428

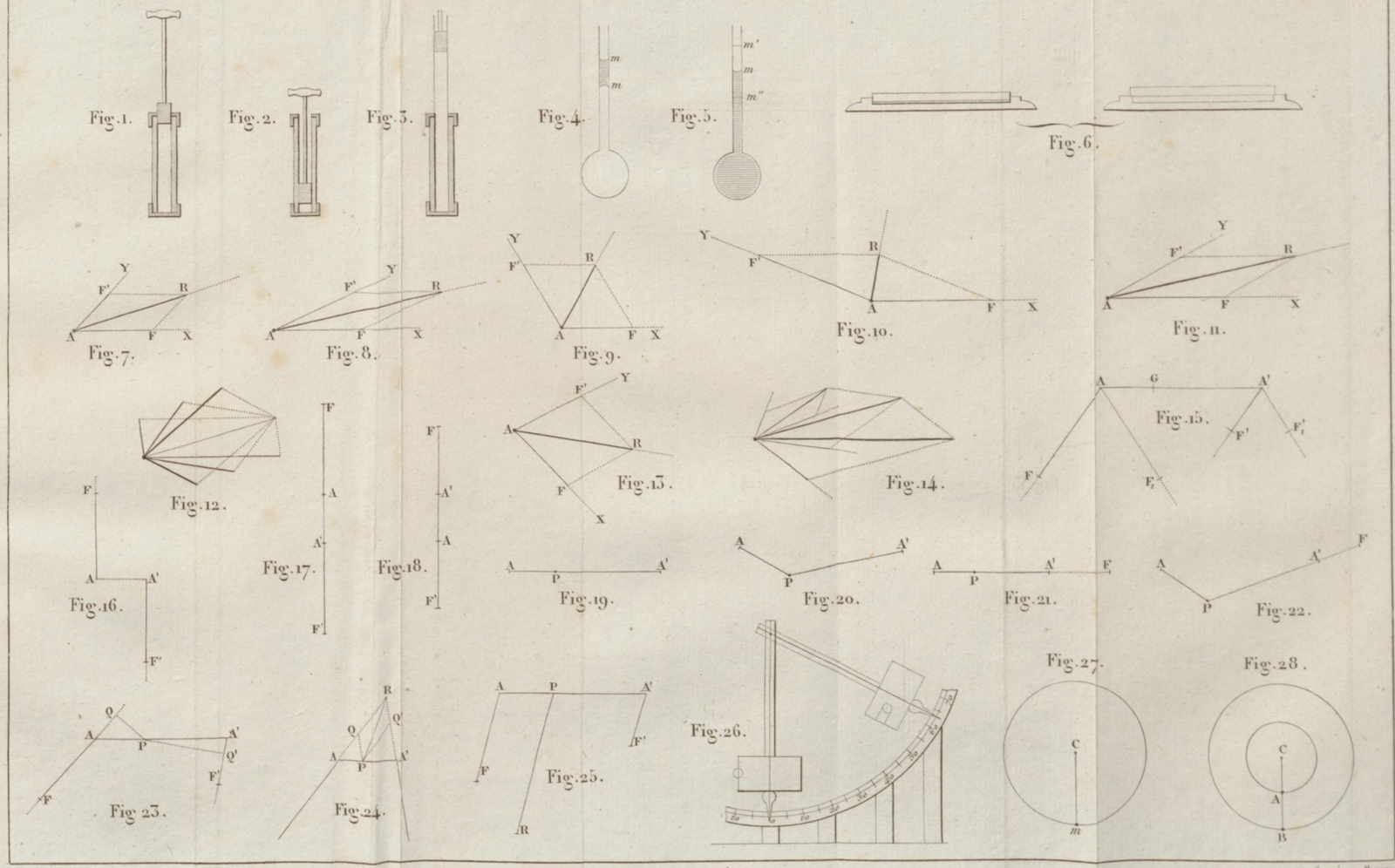
FIN DE LA TABLE.

ERRATA DU PREMIER VOLUME.

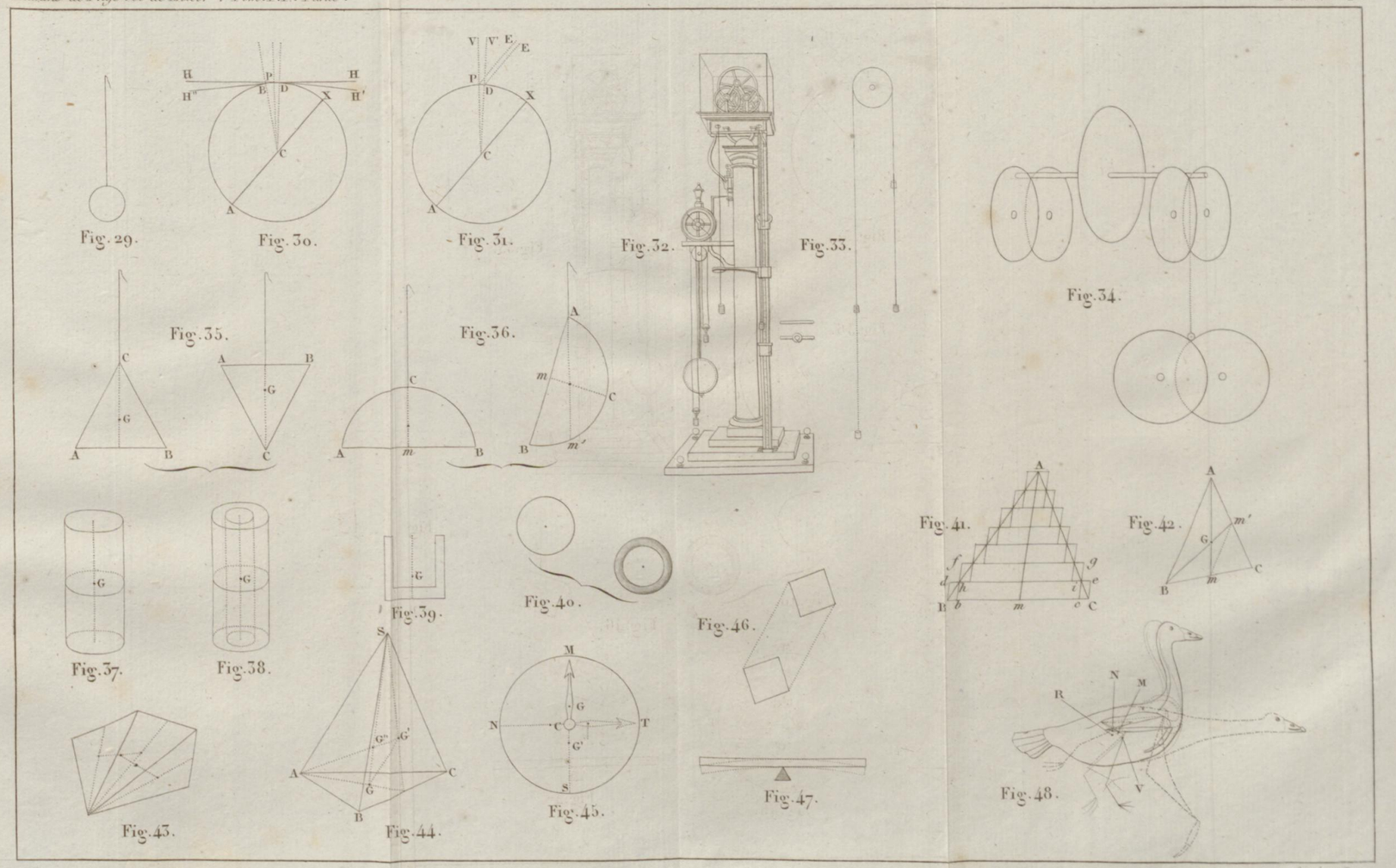
PREMIÈRE PARTIE.

Page 13, lig. 25, le vaste orbite, *lisez* la vaste orbite.
30, 25, les édifices, *lisez* des édifices.
32, 15, le réduire, *lisez* l'enfoncer.
33, 22, *effacez* ne.
40, 17 et 18, celles qui font un angle aigu droit ou obtus, comme pour celles qui font un angle quelconque, *lisez* celles qui font un angle droit ou obtus, comme pour celles qui font un angle aigu quelconque.
41, *dernière*, C A, *lisez* G A.
43, 6, le bras du levier dans la seconde, *lisez* le bras de levier de la seconde.
44, 32, 145 fois, *lisez* 45 fois.
45, 13, l'inertie, *lisez* inertie.
52, 11, le poids, *lisez* la masse.
55, 5, dépendant', *lisez* dépendent.
62, 23, de la stabilité de la terre, *lisez* la stabilité de la terre.
76, 29, tournant d'un axe, *lisez* tournant autour d'un axe.
77, 1, inférieur, *lisez* inférieure.
81, 6, stable ou instable, *lisez* instable ou stable.
85, 12, verticale, *lisez* horizontale.
88, 1, en obtenir la résultante, *lisez* obtenir la résultante de ses actions.
Ib., 4, sa résultante, *lisez* la résultante de ses actions.
92, 10, empêche, *lisez* empêchent.
93, 5, elles sont réduites, *lisez* elle est réduite.
103, 2, en", *lisez* en 60".
116, 35, est la distance, *lisez* a pour diamètre la distance.
127, 16, du fond ; il faut, *lisez* du fond, il faut.
133, 6, *après* d'établir, *à la virgule substituez un point.*
143, 34, de le démontrer, *lisez* de la démontrer.
147, 4, pressés, *lisez* pressées.
149, 15, tout, *lisez* toute.
154, 26, puisse pénétrer, *lisez* ne pénètre.
155, 3, *supprimez* les plus.
157, 26, l'indiquent, *lisez* l'indique.
158, 28, de centimère, *lisez* de centimètre.
164, 16, 3539, *lisez* 3532.
173, 31, les réduisent, *lisez* le réduisent.
Ib., 34, et celui, *lisez* et celle.
182, 35, supérieures et inférieures, *lisez* supérieure et inférieure.
183, 26, un fluide, *lisez* un liquide.
190, 15, 89^{k}, 760, *lisez* 89^{k}, 376.
191, *au titre*, Chapitre VIII, *lisez* Chapitre VII.
216, 15, 62^{p^o}, *lisez* 60^{p^o}.
Ib., *ib.*, 24^{p^o}, *lisez* 23^{p^o}.
223, 15, première, *lisez* la première.
232, 5, rayon, *lisez* diamètre.
235, 24, de l'année dernière, *lisez* 1826.
Ib., 32, ee s'échapper, *lisez* de s'échapper.
236, porte à tort le numéro 26.
Ib., 11, *après* de dehors en dedans, *au point et virgule substituez une virgule.*
238, 14, inogarniques, *lisez* inorganiques.
Ib., 19, simultaniété, *lisez* simultanéité.
239, 28, refrodit, *lisez* refroidit.
242, 11, la calorique, *lisez* le calorique.

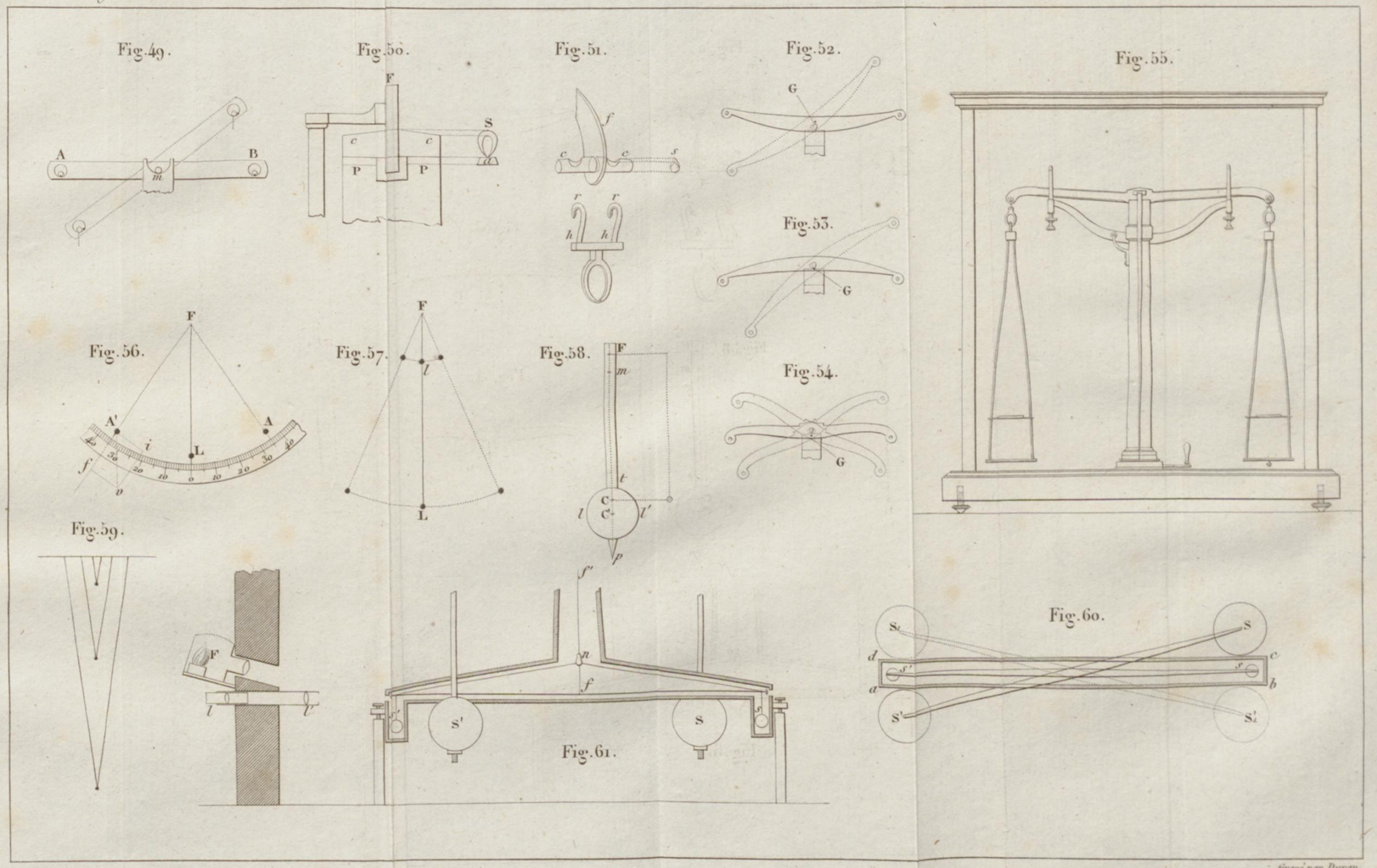
Page 243, lig. 1, vaporsiation, *lisez* vaporisation.
244, 19, de calorique, *lisez* du calorique.
240, 12, à une chaleur sans doute plus grande, *lisez* à une température sans doute plus haute.
253, 11, $1+t'l$, *lisez* $1+t'l$.
256, 1 et 3, Vt, *lisez* V_t.
Ib., 12, 14, 15 et 16, V't, *lisez* V_t'.
267 14, cobique, *lisez* cubique.
268 16, n'est autre chose, *lisez* n'est approximativement.
269, 24, des mêmes, *lisez* de même.
277, 1, *après* des dilatations, *ajoutez* linéaires.
291, 23, acide nitreux, 1,5500, *lisez* acide nitrique, 1,5115.
Ib., 25, acide nitrique, 1,2175, *lisez* acide nitreux, 1,4510.
Ib., 27, bitume liquide de naphte, *lisez* bitume liquide dit naphte.
292, 4, ajuste la partie, *lisez* ajuste à la partie.
294, 20. *supprimez* tantôt.
295, 19, $\frac{1,32}{0,34}$, *lisez* $\frac{1,2}{0,34}$.
297, *au titre* Chapitre VII, *lisez* Chapitre VI.
Ib., 14, lassellaire, *lisez* lamellaire.
Ib., 35, Pouille, *lisez* houille.
297, 38, gélénium, *lisez* sélénium.
306, 16, du carmin, *lisez* de l'orseille.
308, 26, themomètre, *lisez* thermomètre.
317, 26, le verre tantôt, on observe, *lisez* le verre, tantôt on observe.
320, 18, de glaces, *lisez* de glace.
321, 12, un etat, *lisez* un effet.
326, 3, *supprimez* et.
327, 9, et q'insi, *lisez* et qu'ainsi.
330, 32, entre deux, *lisez* entre les deux.
331, 34, du mercure, *lisez* de mercure.
339, 34, qui ne surpasse, *lisez* que ne surpasse.
346, 6, comme des premières, *lisez* comme de premières.
347, 3, chimériquement, *lisez* chimiquement.
349, 22, bases, *lisez* basses.
358, 31, serait $\frac{1}{10000}$, *lisez* serait $\frac{1}{20000}$.
360, 16, ballons verre, *lisez* ballons de verre.
Ib., 28, 109°, *lisez* 106°, 9.
363, 3, 37, 8, *lisez* 35, 6.
Ib., 5, 79,7, *lisez* 78,4.
385, 33, appartemement, *lisez* appartement.
389, 29, l'enciente, *lisez* l'enceinte.
390, 24, $K a \theta$, *lisez* $K a^{\theta}$.
Id., 27, $m a \theta$, *lisez* $m a^{\theta}$.
398, 27, $\frac{x}{x'} \frac{M(\theta-t)}{M'(t-\theta)}$, *lisez* $\frac{x}{x'} = \frac{M(\theta-t)}{M'(t'-\theta)}$.
404, 12, 4 ou 5 millimètres, *lisez* 5 ou 6 millimètres.
407, 31, 760°, *lisez* 760 mm.
415, 32 *du tableau*, Cat-huant, *lisez* Chat-huant.
426, 9, (271), *lisez* (272).
Ib., 14, *après* capacités *supprimez la virgule.*
429, 9, mois, *lisez* moins.
430, 4, tout, *lisez* tous.



Gravé par Durau.



Gravé par Durau.



Gravé par Durau.

Fig. 62.

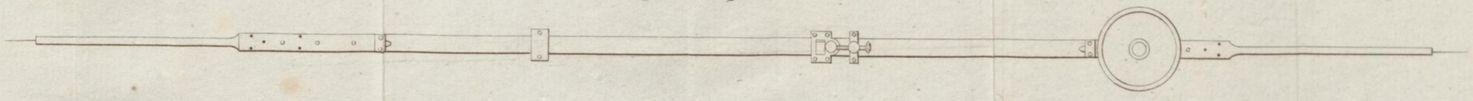


Fig. 63.

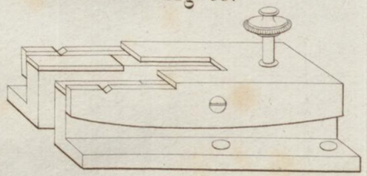


Fig. 64.

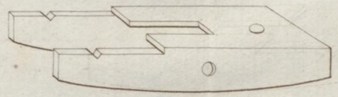


Fig. 67.

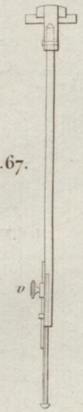


Fig. 68.

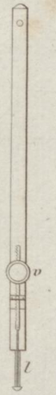


Fig. 66.

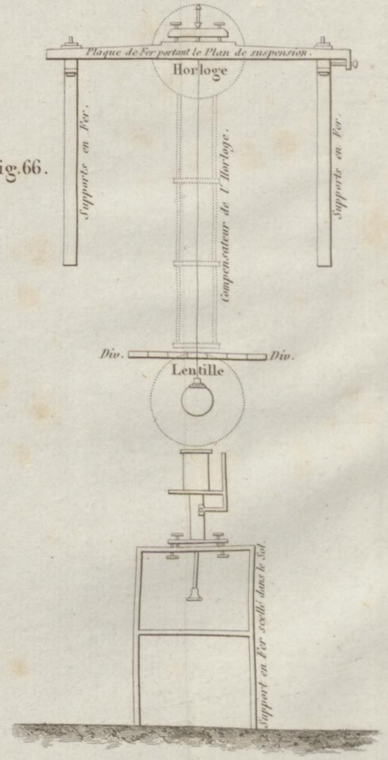


Fig. 71.

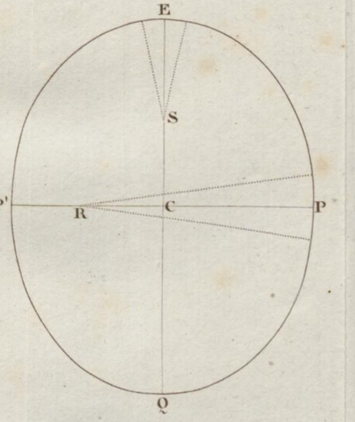


Fig. 70.

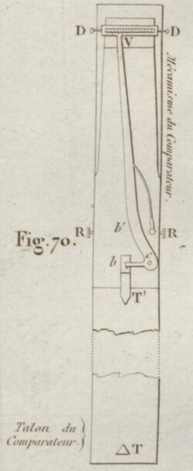


Fig. 65.

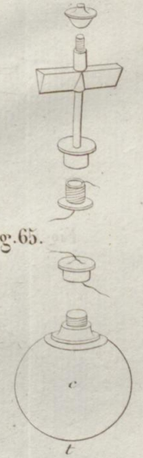


Fig. 69.

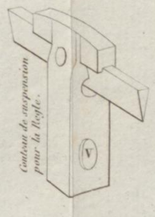


Fig. 72.

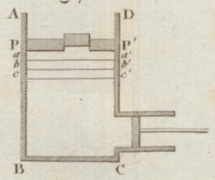


Fig. 73.

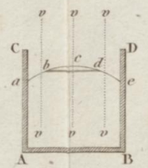


Fig. 74.



Fig. 75.

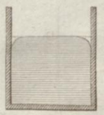


Fig. 76.

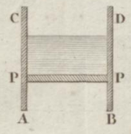


Fig. 77.

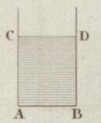


Fig. 78.

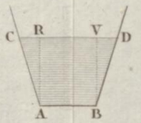


Fig. 79.

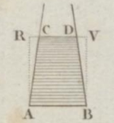


Fig. 80.

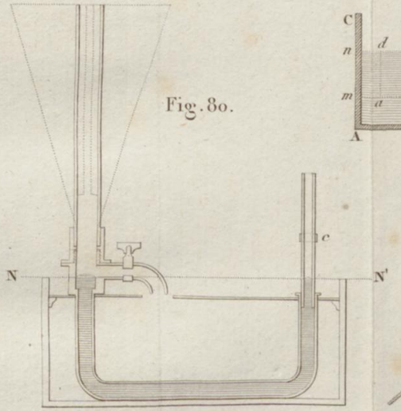


Fig. 81.

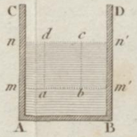


Fig. 82.

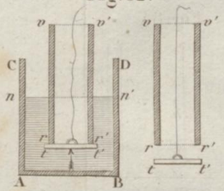


Fig. 83.

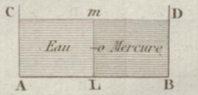


Fig. 84.

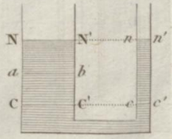


Fig. 85.

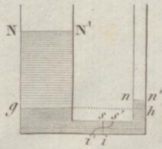


Fig. 86.

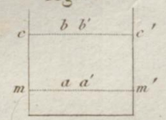


Fig. 87.



Fig. 88.

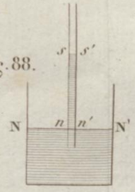


Fig. 89.

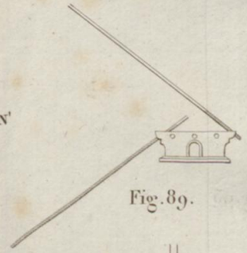


Fig. 90.

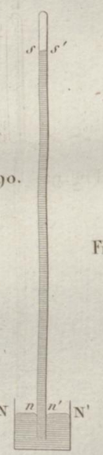


Fig. 90 bis.

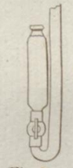


Fig. 91.

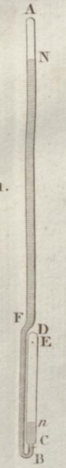


Fig. 91 bis.

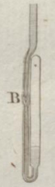


Fig. 92.



Fig. 93.



Fig. 94.



Gravé par Duvau.

Fig. 95.

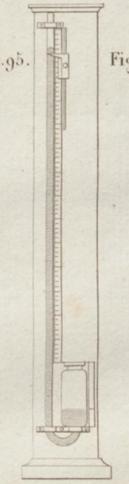


Fig. 96.



Fig. 97.

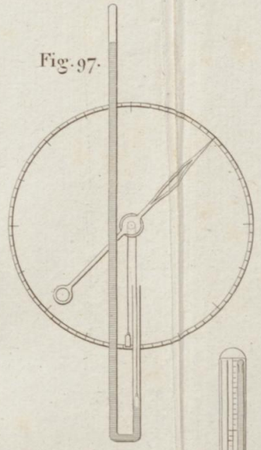


Fig. 98.

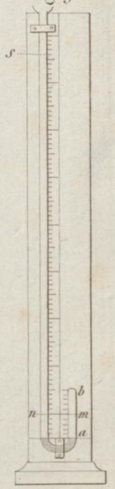


Fig. 99.



Fig. 100.



Fig. 101.



Fig. 102.

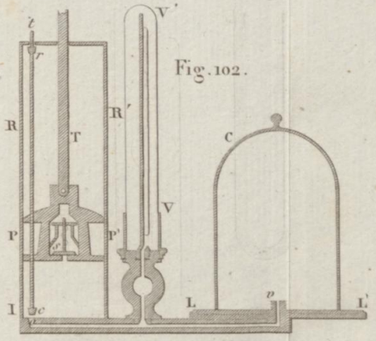


Fig. 103.

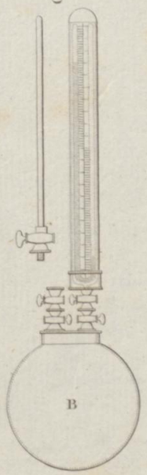


Fig. 104.



Fig. 105.

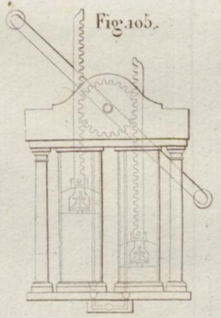


Fig. 106.

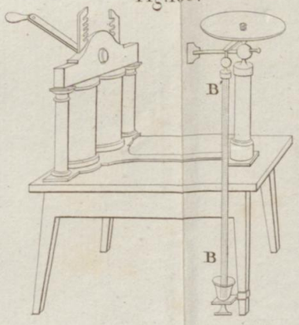


Fig. 107.

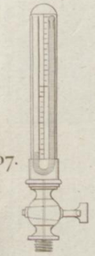


Fig. 108.

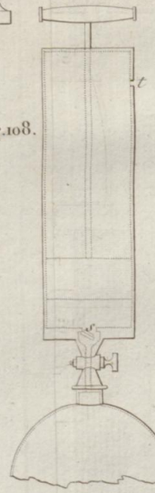


Fig. 109.

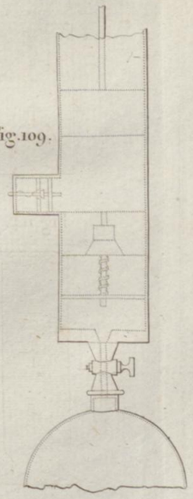


Fig. 110.

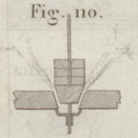


Fig. 111.



Fig. 112.

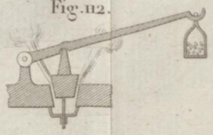


Fig. 113.

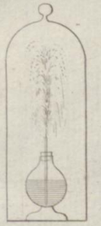


Fig. 114.

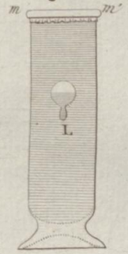


Fig. 115.

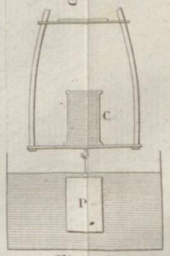


Fig. 116.

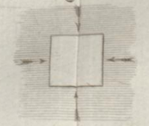


Fig. 117.

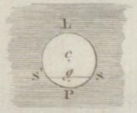


Fig. 118.

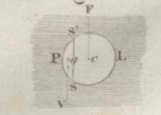
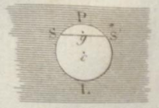


Fig. 119.



Gravé par Durau.

Fig. 120.

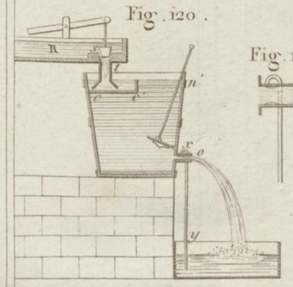


Fig. 121.

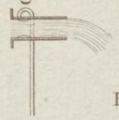


Fig. 122.



Fig. 123.



Fig. 124.

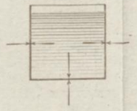


Fig. 125.



Fig. 126.

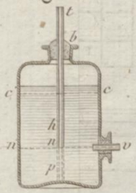


Fig. 127.

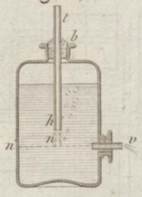


Fig. 128.



Fig. 129.

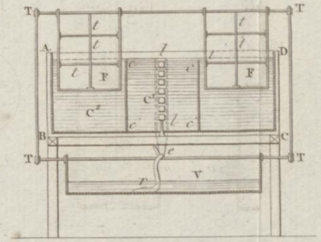


Fig. 130.

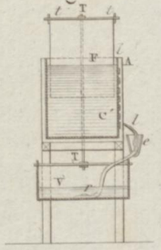


Fig. 131.



Fig. 132.



Fig. 133.



Fig. 134.



Fig. 135.



Fig. 136.



Fig. 137.



Fig. 138.

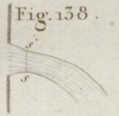


Fig. 139.

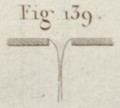


Fig. 140.



Fig. 141.

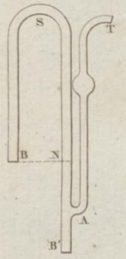


Fig. 142.

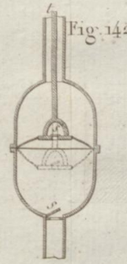


Fig. 143.

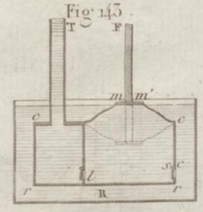


Fig. 144.

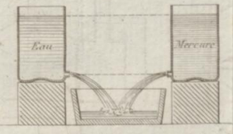


Fig. 145.



Fig. 146.



Fig. 147.



Fig. 148.



Fig. 149.

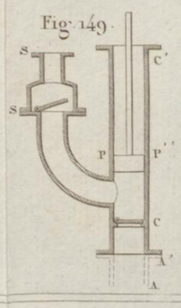


Fig. 150.

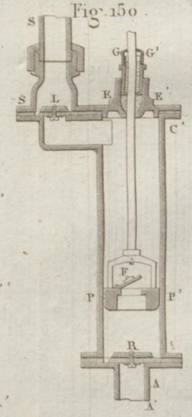


Fig. 151.

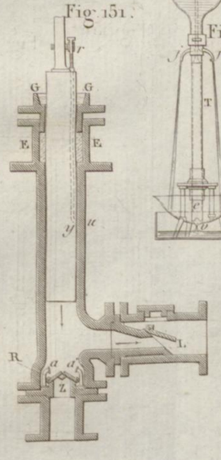


Fig. 150.

Fig. 153.

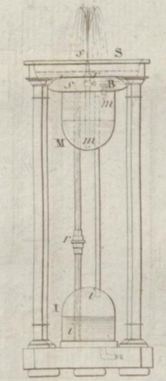


Fig. 154.

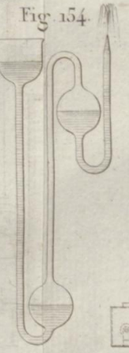
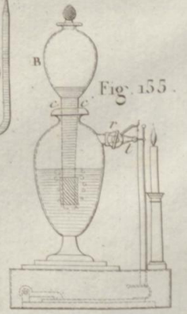
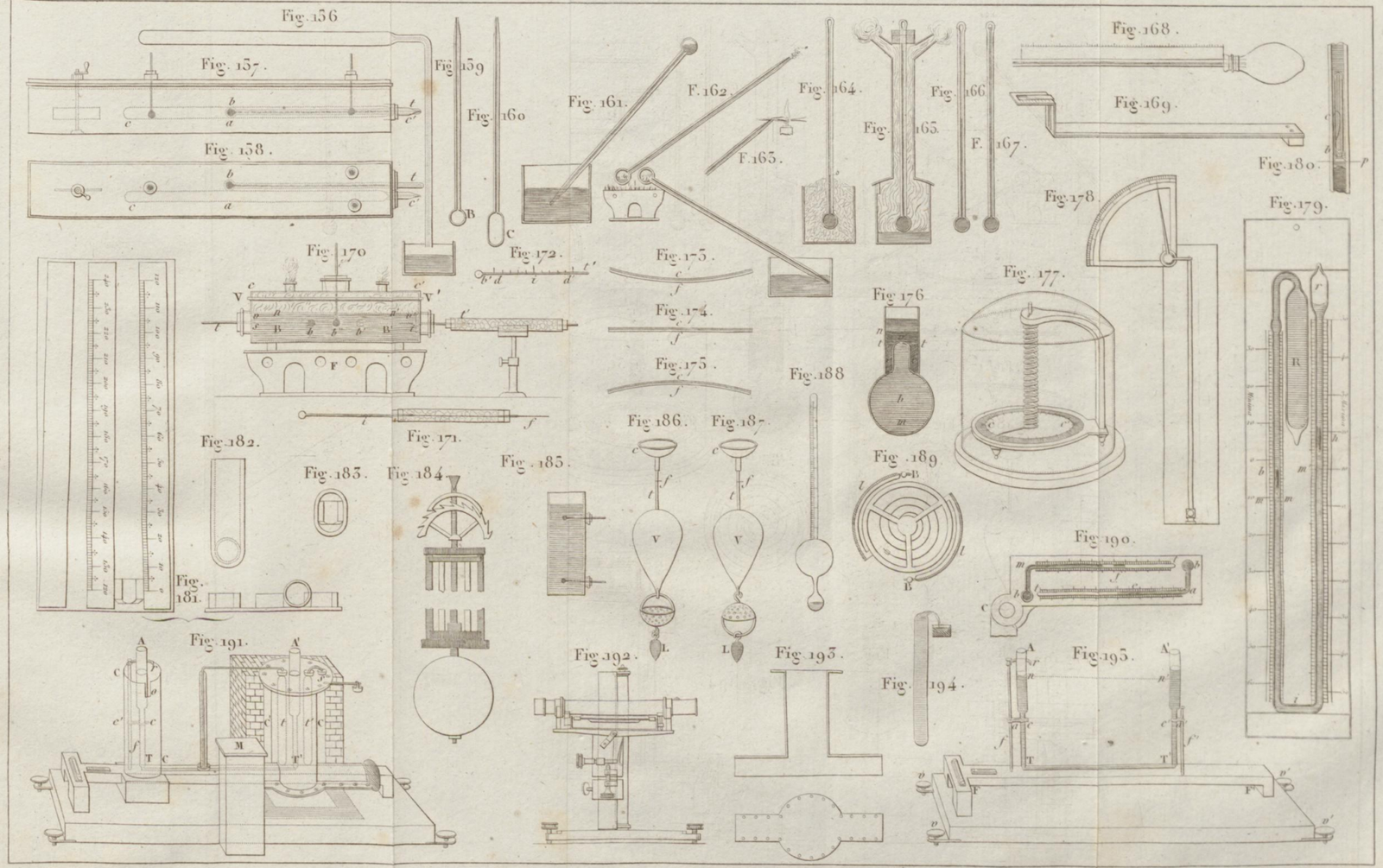
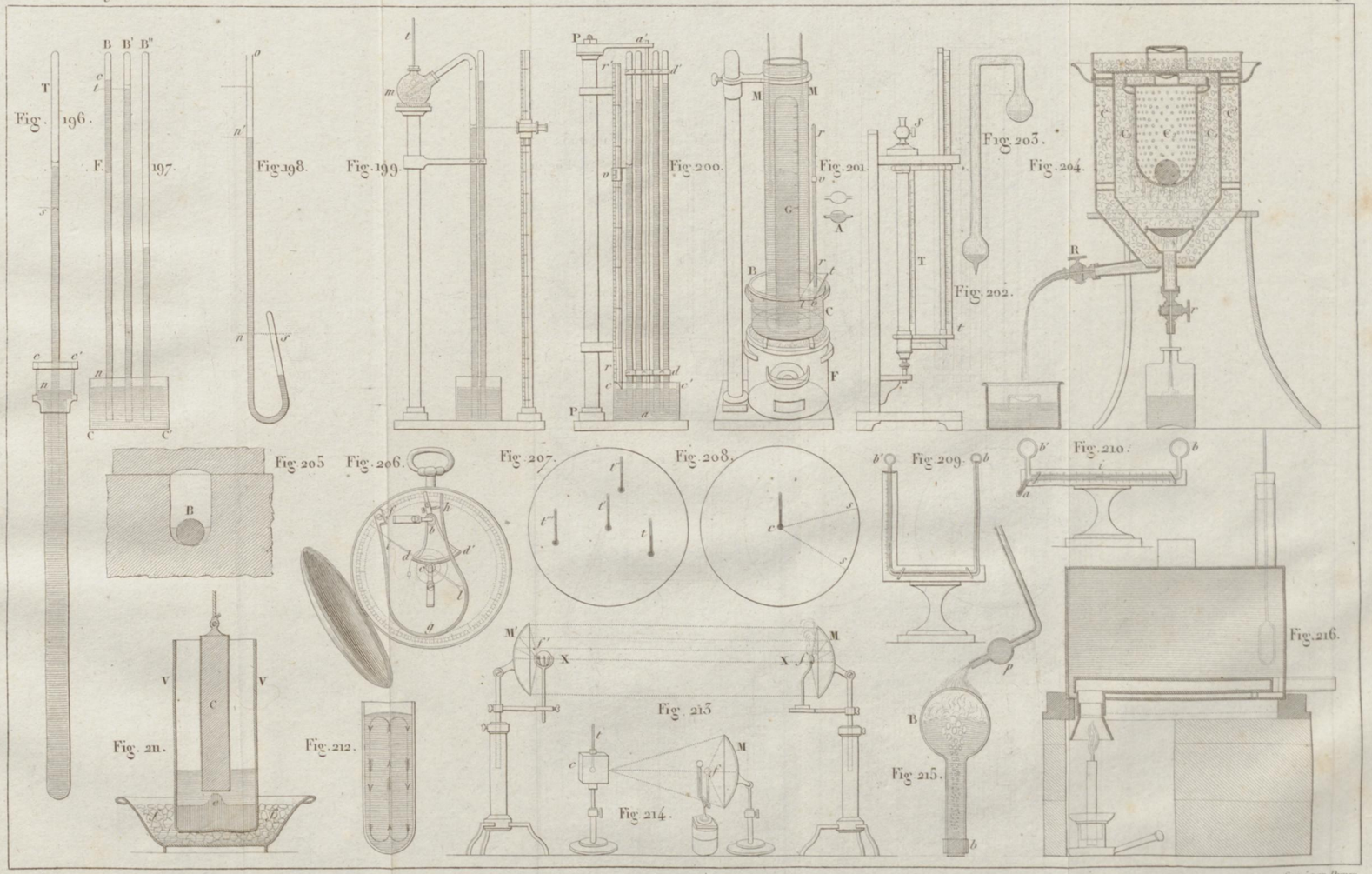


Fig. 155.





Gravé par Duran.



Gravé par Dureau.

Fig. 217.



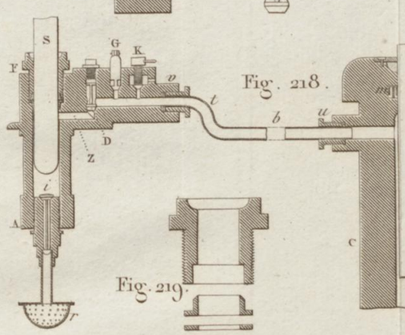


Fig. 218.

Fig. 219.

Fig. 220.

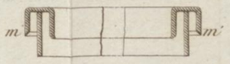


Fig. 221.

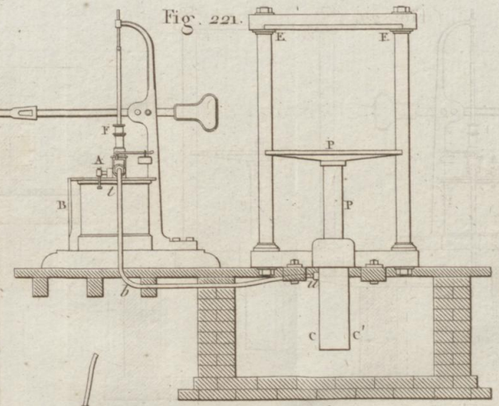


Fig. 222.

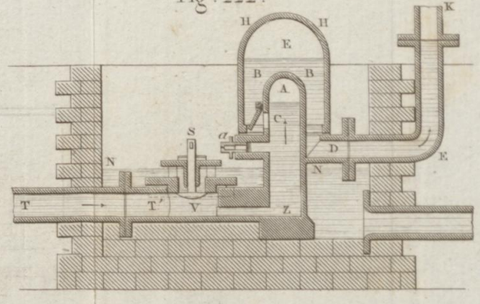


Fig. 223.

Fig. 224.

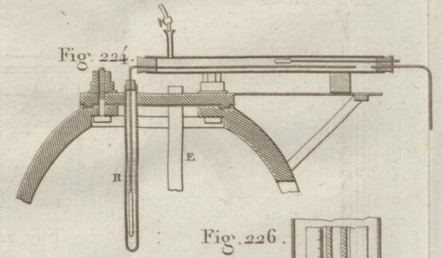


Fig. 225.

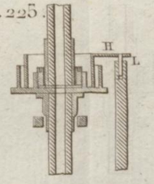


Fig. 226.

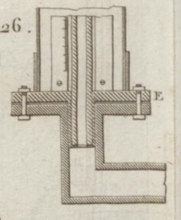


Fig. 227.

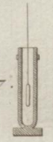


Fig. 228.

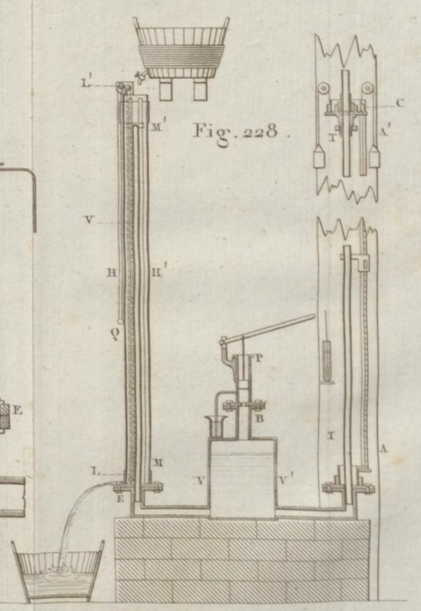


Fig. 229.

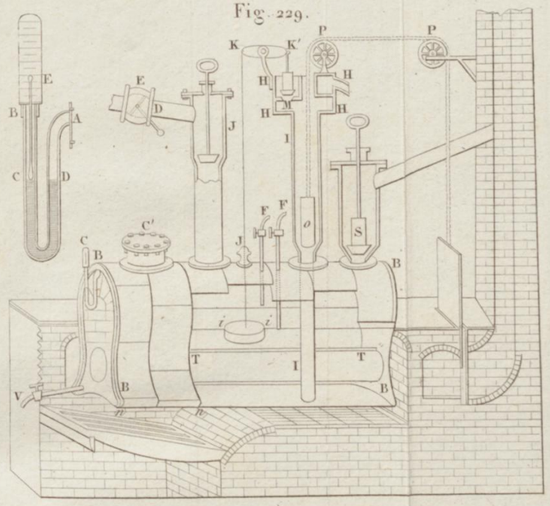


Fig. 230.

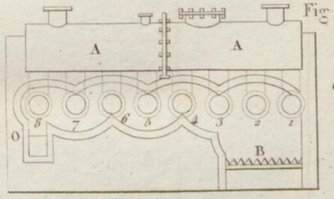


Fig. 232.

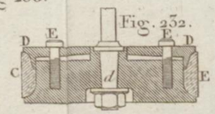
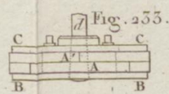


Fig. 233.



F. 231.

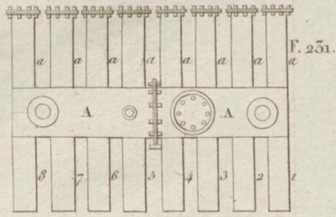


Fig. 234.



Fig. 236.

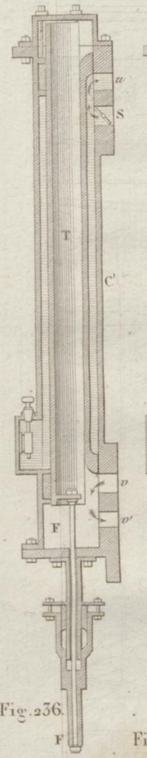


Fig. 237.

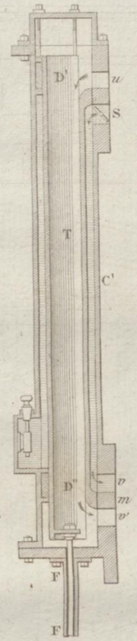


Fig. 235.



Fig. 239.

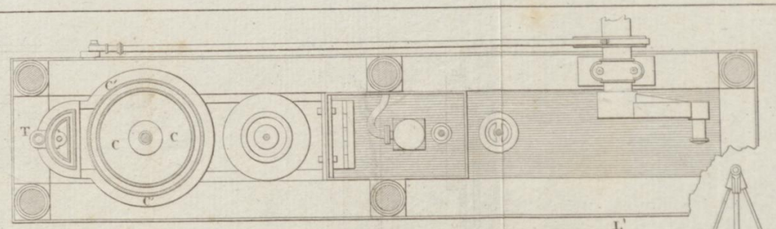
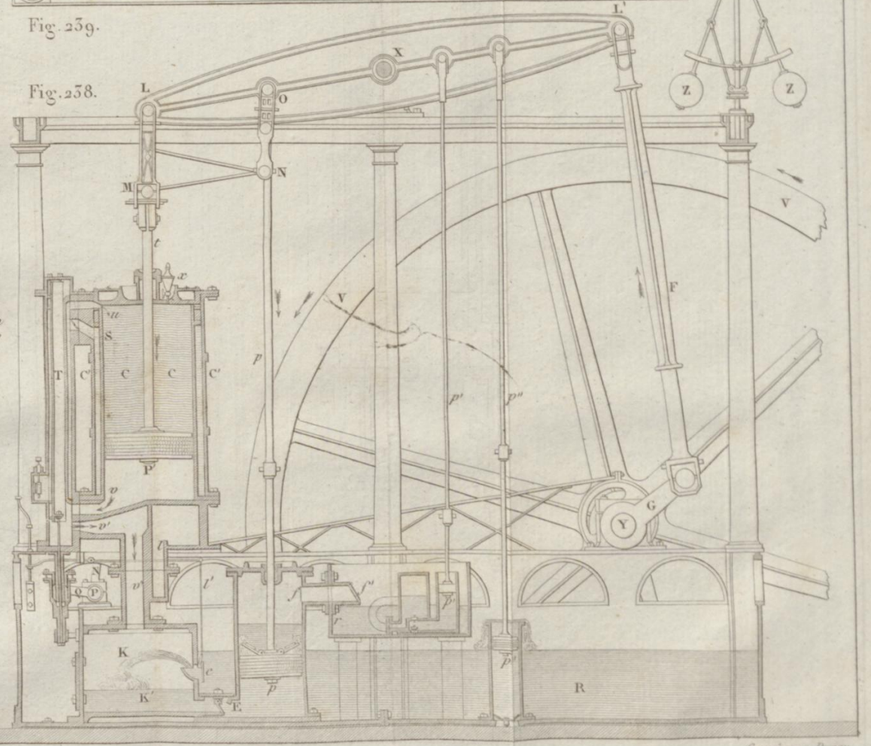


Fig. 238.



ETH Zürich
Bibliothek

Abt.	T	Nummer	U	Band	Teil	Aufl.	E	S
7		78136		1	1 ‰*			

BUCHKARTE
Bitte nicht herausnehmen!

12/72

34256

4 Bände

6 Fr

~~78136:1/2~~
~~2~~
Rar 24601: 1/2

M. Isenschmid. Stud. Med.
Mars. 35.

Louis Rollier
Professeur

St. Imier. 1886

BIBLIOTHEK D. EIDG. TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

ÉLÉMENS
DE PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE
ET
DE MÉTÉOROLOGIE.

TOME I.

DEUXIÈME PARTIE.

SE TROUVE AUSSI CHEZ LES LIBRAIRES CI-APRÈS :

A BRUXELLES, chez M. TIRCHER ;

A GAND, chez M. DUJARDIN ;

A LIÉGE, chez M. DESOER ;

A MONS, chez M. LEROUX.

PARIS. — IMPRIMERIE DE COSSON,
RUE SAINT-GERMAIN-DES-PRÉS, N° 9.

ÉLÉMENS
DE
PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE
ET DE
MÉTÉOROLOGIE,

PAR M. POUILLET,
Professeur de Physique à la Faculté des Sciences et à l'École Polytechnique; Membre de la Société philomatique, du Conseil de la Société d'Encouragement, etc.

OUVRAGE ADOPTÉ PAR LE CONSEIL ROYAL DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE POUR L'ENSEIGNEMENT DANS LES ÉTABLISSEMENS DE L'UNIVERSITÉ.

SECONDE ÉDITION, REVUE, CORRIGÉE ET AUGMENTÉE.

Verus experientiæ ordo primo lumen accendit, deinde per lumen iter demonstrat.

BACON, *Nov. Org.*

BIBLIOTHEK D. EIDG. TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

TOME PREMIER.

DEUXIÈME PARTIE.

A PARIS,
CHEZ BÉCHET JEUNE,
LIBRAIRE DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE,
PLACE DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE, N° 4.

1832.

ETH-BIBLIOTHEK
ZÜRICH

78136:1/2

LIVRE TROISIÈME.

DU MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER.

De l'action des Aimans sur eux-mêmes et sur les substances magnétiques.

290. On trouve dans la nature, et presque dans toutes les contrées de la terre, des substances minérales qui ont la propriété d'attirer le fer. Ces substances, quelle que soit leur forme ou leur composition, s'appellent des *aimans naturels*; autrefois on les appelait *pierres d'aimant*, parce qu'en effet elles offrent dans leur structure une apparence pierreuse plutôt qu'une apparence métallique. Il y a des aimans très-*faibles*, c'est-à-dire que, sous un grand volume, ils n'exercent sur le fer qu'une attraction peu sensible; mis en contact avec de la fine limaille, ils peuvent à peine en soulever quelques parcelles: mais il s'en trouve quelquefois de très-*puissans*, c'est-à-dire que, sous un volume de quelques pouces cubes, ils sont capables de tenir suspendues des masses de plus de cinquante ou même de plus de cent kilogrammes. Ces divers degrés dans l'énergie des aimans dépendent, comme nous le verrons plus tard, de quelque arrangement particulier de leurs molécules. Si la force était proportionnelle à la masse, on pourrait produire des phénomènes d'une intensité prodigieuse, puisqu'il y a des aimans qui n'ont pas seulement quelques pieds

cubes en volume, ou quelques quintaux en poids, mais qui composent d'immenses montagnes à la surface de la terre.

Pour étudier la force attractive qui s'exerce entre le fer et l'aimant, on peut plonger un aimant, par une de ses extrémités, dans de la limaille ou dans de la tournure de fer; alors s'il est un peu énergique, on voit les parcelles de métal s'attacher à sa surface, et s'attacher les unes aux autres en formant une sorte de chevelure de plusieurs lignes de longueur. Cette adhérence des particules entre elles et leur arrangement est un phénomène digne de remarque, sur lequel nous reviendrons dans la suite; pour le moment nous nous contenterons de le regarder comme une simple preuve d'attraction. L'on peut aussi présenter à l'aimant, suivant son degré de force, des morceaux de fer plus ou moins volumineux; à peine en sont-ils approchés à quelques millimètres de distance qu'on les sent devenir plus légers; ils sont vivement entraînés, et se précipitent sur la surface pour y rester suspendus; il faut ensuite un effort plus ou moins considérable pour les en arracher. On peut encore suspendre une petite balle de fer à un fil flexible, et en approcher peu à peu la surface de l'aimant; de cette manière on reconnaît quelques caractères esssentiels de sa force attactive; il est facile de constater, 1° qu'elle s'exerce à distance; 2° qu'elle s'exerce au travers de l'air, au travers du vide et au travers de tous les corps quels qu'ils soient, pourvu qu'ils ne soient pas du fer; 3° qu'elle diminue à mesure que la distance augmente.

Toutes les attractions étant réciproques, on doit conclure que si l'aimant attire le fer, il est attiré par lui avec la même énergie et suivant les mêmes lois. Cette vérité nécessaire peut, au reste, se vérifier directement par des expériences inverses des précédentes, en suspendant l'aimant pour le rendre mobile, et en faisant agir sur lui des morceaux de fer à diverses distances.

Cette force attractive étant distincte de toutes les autres forces naturelles, on lui donne un nom particulier, on l'appelle *force magnétique*, du mot μάγνης, qui était chez les Grecs le nom de la pierre d'aimant; car les anciens avaient quelque connaissance de ses propriétés; Platon en parle dans plusieurs de ses dialogues, et il faut remonter jusqu'au temps de Pythagore pour recueillir les premières notions qui nous aient été transmises sur se sujet. Nous verrons bientôt que la force magnétique peut être attribuée à une substance analogue à celle du calorique, ou à un fluide particulier existant comme le calorique dans les intervalles qui séparent les molécules de la matière pondérable; ce fluide est ce que nous appelons le *fluide magnétique*, ou simplement le *magnétisme*, en désignant ainsi par le même mot et l'agent qui produit les phénomènes et la science qui a pour objet de les découvrir, de les comparer et de les expliquer ou de les rapporter à une même principe.

Toute force attractive ayant deux siéges ou deux termes, le corps attirant et le corps attiré, nous allons d'abord étudier la force magnétique dans l'aimant où elle réside et d'où elle semble tirer sa première origine.

291. *Tout aimant a une ligne moyenne et deux pôles.* —Le fer semble être à l'égard de l'aimant ce que sont les corps pesans par rapport au globe de la terre : la masse du globe attire les corps dans tous les sens et les presse sur sa surface; essayons de voir s'il en est de même de l'aimant, et si de tous les points de son contour il exerce une action pareille pour solliciter les parcelles de fer et pour les attirer vers son centre. Reprenons pour cela le *pendule magnétique*, c'est à-dire la petite balle ou le petit fil de fer suspendue à un fil flexible. En tenant l'aimant à la même distance du pendule, on reconnaît bientôt que certains points de sa surface lui impriment une grande déviation, tandis que d'autres points ne produisent qu'une déviation nulle ou insensible; il y a surtout deux régions opposées

qui montrent une action très-vive, et c'est sur l'intervalle qui les sépare que l'on aperçoit le moindre effet. On est conduit au même résultat, soit qu'on emploie pour cette expérience un aimant naturel avec sa forme irrégulière, ou un aimant artificiel ayant la forme d'un cylindre ou d'un prisme allongé. Dans ce dernier cas la différence est plus frappante, et l'on voit sans peine que les sections transversales qui avoisinent le milieu de l'aimant n'agissent point sur le pendule, tandis que les parties extrêmes agissent avec une grande force. On peut donc sur la surface d'un aimant, et vers le milieu de sa longueur, tracer une ligne dont les points n'exercent aucune action attractive; c'est cette ligne que nous appelons *ligne neutre* ou *ligne moyenne*. Elle partage l'aimant en deux parties, que nous appelons les deux *pôles* de l'aimant. Ce même mot *pôle* sera pris encore dans deux autres acceptions différentes; nous nous en servirons pour désigner seulement les parties de la surface les plus éloignées de la ligne moyenne, et sur lesquelles l'attraction est la plus forte; et nous nous en servirons aussi pour désigner un point idéal qui sera conçu dans l'intérieur de l'aimant, à peu près comme le centre de gravité est conçu dans l'intérieur des corps, ou dans la masse du globe terrestre qui les attire; car une parcelle de fer n'est pas sollicitée seulement par le point de l'aimant auquel elle vient s'attacher, elle est sollicitée par toute la portion qui est d'un même côté de la ligne moyenne, et la résultante de toutes ces attractions est appliquée en un certain point que nous appellerons le pôle de cette portion de l'aimant. Il sera toujours facile de distinguer celle de ces trois acceptions dans laquelle nous entendrons que le mot pôle est employé. Dans tous les cas, on voit qu'un aimant a une ligne moyenne et deux pôles.

Cette proposition fondamentale peut encore être démontrée par d'autres expériences plus faciles et plus décisives. Si l'on roule un aimant dans de la limaille de fer, il se

couvre de filamens plus ou moins allongés, qui montrent à l'œil l'inégale attraction des différens points de sa surface. Cet arrangement est représenté (*Fig.* 1) pour un aimant naturel, et (*Fig.* 2) pour un aimant artificiel. Aux extrémités E et E′ les filamens de limaille sont très-longs et dressés perpendiculairement à la surface; sur les sections moins extrêmes ils deviennent plus courts, et commencent à s'incliner, comme s'ils fuyaient les extrémités pour se rapprocher du milieu; enfin sur la section moyenne *mm′* aucune parcelle de limaille ne reste attachée: les filamens qu'on y voit prennent naissance de part et d'autre de cette ligne, et semblent la franchir pour se joindre et s'appliquer sur la surface de l'aimant. *mm′* est la ligne moyenne, les deux moitiés P et P′ sont les *pôles* de l'aimant, cette dénomination, comme nous venons de le dire, s'appliquant quelquefois aux deux extrémités E et E′, où l'action est la plus forte, et d'autres fois aux deux points *p* et *p′*, que l'on peut regarder comme les centres de l'attraction.

On reproduit des effets analogues, en mettant sur un aimant une feuille de carton lisse, sur laquelle on laisse tomber de la fine limaille avec un petit tamis par des chocs légers que l'on imprime au carton, la limaille s'arrange en courbes régulières qui sont représentées *Fig.* 5. L'aimant et indiqué par des lignes ponctuées; la ligne moyenne est en *mm′*. Cette expérience fait voir, mieux encore que les précédentes, comment les filets de limaille, partant des deux côtés de la ligne moyenne, passent sur cette ligne pour se rejoindre; elle offre aussi une preuve que l'attraction de l'aimant s'exerce au travers de la substance du carton.

Les aimans pouvant être brisés ou coupés suivant la ligne moyenne, il semble, au premier coup d'œil, que les deux portions qui en résultent doivent nécessairement échapper à la proposition dont il s'agit. On pourrait bien supposer que, séparées l'une de l'autre, elles perdent leur propriété magnétique; mais on n'imagine pas que, si elles en conser-

vent quelque chose, elles puissent avoir une ligne moyenne et deux pôles. L'expérience en est facile à faire : nous verrons plus loin qu'avec de l'acier trempé très-dur on peut faire des aimans qui cassent comme du verre. Prenons un aimant de cette espèce; brisons-le suivant la ligne moyenne; et plongeons dans la limaille chacune de ses moitiés pour observer les modifications qu'elles ont éprouvées. Nous trouverons, avec quelque surprise, que chacune d'elles est un aimant tout entier ayant ses deux pôles, et sa ligne moyenne au milieu. En les brisant de nouveau, les moitiés de ces moitiés présenteront les mêmes phénomènes, et l'on pourra pousser ces subdivisions aussi loin que l'on voudra, sans jamais trouver de limite à cette propriété : les derniers fragmens seront des aimans entiers, offrant, comme l'aimant primitif, une ligne moyenne et deux pôles. Nous verrons plus tard la raison de ce fait; mais il est bon de l'indiquer ici pour faire comprendre toute la généralité du principe dont il s'agit, et pour montrer ainsi l'impossibilité absolue où nos sommes de former un aimant qui n'ait qu'un seul pôle.

292. *Les pôles de même nom se repoussent, et ceux de noms contraires s'attirent.* — La *Figure* 6 représente un aimant suspendu horizontalement, au moyen d'une chape de papier ou de métal et d'un fil sans torsion; à chacun de ses pôles A et B on présente successivement le même pôle d'un autre aimant pareil; le pôle A est attiré, le pôle B repoussé; et l'on dit que ces deux pôles A et B sont de *noms contraires*, parce qu'ils agissent en sens contraire sur le même pôle qui leur est présenté. Si les deux pôles de ce premier aimant sont de noms contraires, il est naturel de supposer que ceux du deuxième aimant sont pareillement de noms contraires, et qu'il en est de même de tous les aimans possibles. En effet, si l'on retourne ce deuxième aimant pour le faire agir par son autre pôle sur l'aimant suspendu, on reconnaît de suite que les pôles A et B éprouvent maintenant

des effets contraires : A est repoussé et B attiré ; donc les deux pôles de l'aimant libre que l'on tient à la main sont aussi des noms contraires, puisque l'un attire ce que l'autre repousse, *et vice versâ*. Tout aimant libre présente le même phénomène. Nous appellerons *pôles de même nom* les pôles de différens aimans qui agissent de la même manière, soit sur le pôle A, soit sur le pôle B de l'aimant suspendu. Ces pôles une fois marqués sur plusieurs aimans afin de les bien reconnaître, que l'on suspende l'un de ces aimans pour faire agir les autres sur lui, et l'on verra que tous les pôles de même nom se repoussent, tandis que tous les autres qui sont de noms contraires s'attirent.

Ainsi de part et d'autre de la ligne moyenne dans les deux moitiés d'un aimant résident deux forces, qui d'abord nous semblaient identiques, parce qu'elles agissaient de la même manière sur le fer, et qui sont en réalité deux forces opposées, puisqu'elles agissent en sens contraire sur les aimans, l'une attirant ce que l'autre repousse. La ligne moyenne est la limite de ces deux forces antagonistes ; elle est le passage de l'une à l'autre, et c'est là ce qui rend raison de la neutralité qu'elle conserve. Ces deux forces tendent sans cesse à se neutraliser ou à se détruire, et si l'on pouvait, par exemple, dans un aimant donné, incorporer un autre aimant de mêmes dimensions et de même force, de manière que les pôles de noms contraires se correspondissent ; au lieu de deux aimans égaux l'on n'aurait plus qu'une masse inerte entièrement dépouillée de ses facultés magnétiques. Par la simple superposition la destruction n'est pas complète, parce que les diverses parties de l'un des aimans n'agissent pas à la même distance que les parties homologues de l'autre ; mais du moins il y a dans ce cas une réduction très-sensible dans l'intensité de la force ; c'est ce que l'on démontre par l'expérience suivante. Un aimant horizontal AB (*Fig.* 8) porte vers son extrémité une masse de fer F dont le poids est à peu près tout ce qu'il peut porter ;

on approche un autre aimant de même force, de manière que le pôle A corresponde au pôle de nom contraire B; dès que la distance est assez petite la masse F se détache et tombe; le système des deux aimans ne peut plus porter ce que l'un d'eux portait facilement, parce que les actions des deux pôles contraires tendent à se neutraliser. Il est inutile de remarquer que si les pôles du second aimant correspondaient aux pôles de même nom du premier, non seulement la masse F ne se détacherait pas, mais on pourrait en augmenter le poids, et *presque* le doubler sans qu'elle tombât, parce qu'alors les pôles de même nom exerçant des actions conspirantes, leur effet total est, à quelques modifications près, la somme de leurs effets particuliers.

293. *Les actions magnétiques peuvent être attribuées à un fluide particulier.*—Lorsqu'on cherche à remonter à l'origine des forces qui produisent les phénomènes magnétiques, on reconnaît bientôt qu'elles ne sont pas, comme la pesanteur, une propriété inhérente à la matièree pondérable. L'analyse chimique a démontré que les aimans naturels ne sont que des oxides de fer ou des mélanges d'oxides de fer à différens degrés de saturation; l'oxigène et le fer sont donc les seuls élémens pondérables qui entrent dans la composition de ces corps singuliers. Or, ni l'un ni l'autre de ces élémens n'ayant la propriété permanente d'exercer des actions pareilles aux actions magnétiques, il est peu probable que leurs molécules prennent en se combinant des propriétés essentielles qu'elles n'avaient pas avant leur combinaison; car dans la matière pondérable on n'observe jamais que la forme, l'arrangement ou la disposition des molécules donne naissance à des forces nouvelles qui puissent s'exercer à des distances sensibles. D'une autre part, les forces inhérentes à la matière pondérable peuvent bien être augmentées ou diminuées, ou modifiées de mille manières, mais elles ne peuvent jamais se détruire ou disparaître; tandis que dans les aimans les forces magnétiques ne paraissent qu'acciden-

tellement. On en donne la preuve en faisant chauffer un aimant jusqu'à la température rouge; par cette opération il ne perd rien de ses élémens matériels, et cependant il perd toutes ses propriétés magnétiques. Après le refroidissement, il est, en ce qui tient à la matière, tout-à-fait ce qu'il était auparavant; mais en ce qui tient au magnétisme, il n'est plus rien absolument, car il n'exerce plus aucune action sur le fer. Il y a même plus, on peut lui rendre ses propriétés magnétiques sans rien lui donner et sans rien lui ôter de pondérable. C'est par ces raisons, et par d'autres encore, résultant de l'ensemble des phénomènes, que l'on est conduit à regarder le magnétisme comme un fluide d'une espèce particulière, répandu dans la masse pesante de l'oxide de fer qui constitue l'aimant. Et puisque nous avons reconnu qu'il y a deux forces magnétiques opposées, nous devons conclure aussi qu'il y a deux fluides contraires, l'un qui *prédomine* dans l'un des pôles, et l'autre qui *prédomine* dans l'autre pôle. Dans tous les aimans, les pôles de même nom auront le même fluide prédominant; et comme ils se repoussent, nous en conclurons que chaque fluide se repousse lui-même: les pôles de nom contraire auront des fluides différens; et comme ils s'attirent, nous en conclurons que l'un des fluides attire l'autre. Ainsi nous sommes conduits à ce résultat définitif qu'il existe deux fluides magnétiques, dont chacun se repousse et attire l'autre.

Ces fluides doivent pareillement exister dans le fer; car s'ils sont distincts de la matière pondérable, on peut présumer que l'action qui s'exerce sur le fer ne s'exerce pas sur les molécules matérielles du fer, mais bien sur les fluides magnétiques contenus dans les intervalles de ces molécules. Nous avons donc quelque raison de chercher le fluide magnétique dans le fer, et de tenter les expériences qui peuvent nous faire découvrir son mode d'existence.

294. *Sous l'influence de l'aimant le fer devient lui-même un aimant.* — Pour démontrer cette propriété du fer, on

peut disposer l'expérience comme elle est indiquée dans la *figure* 9. F est un cylindre de fer soutenu par un aimant AB; à son extrémité inférieure on présente de la limaille, qui s'y attache en forme de houppe, et qui reste suspendue aussi long-temps que le petit cylindre est lui-même suspendu à l'aimant; mais si on l'en détache, à l'instant toute la limaille tombe, et l'on n'observe plus aucune force attractive. Ce n'est pas la force de l'aimant qui agit à distance sur la limaille et la maintient suspendue; car si le petit cylindre n'était pas de fer, le phénomène ne se produirait pas, et l'on peut encore bien mieux s'en convaincre, en observant 1° que les filets de limaille diminuent de longueur, à partir de l'extrémité du petit cylindre; 2° qu'il y a un point vers la partie supérieure où ils ne peuvent plus s'attacher, ce qui forme la ligne moyenne; 3° qu'au dessus de ce point ils s'attachent de nouveau, en se dirigeant en sens contraire. Ainsi le petit cylindre est bien véritablement un aimant, puisqu'il attire la limaille, et qu'il a une ligne moyenne et deux pôles; seulement sa ligne moyenne n'est pas au milieu.

Au lieu d'offrir de la limaille au cylindre suspendu, on lui donne un autre cylindre pareil, et il le peut porter (*Fig.* 10); à celui-ci on en donne un troisième, qu'il porte pareillement; à celui-ci un quatrième, et l'on forme ainsi une sorte de chaîne dont l'aimant est comme le principe et le premier anneau; si bien que le premier anneau manquant, toute la chaîne tombe et se brise, les autres anneaux n'ayant plus d'action pour se lier l'un à l'autre.

On peut démontrer la même chose, en mettant le petit cylindre de fer dans le prolongement du barreau, sur une feuille de papier blanc (*Fig.* 3.). La limaille que l'on projette sur son contour s'y arrange régulièrement, et laisse voir en *mm'* une ligne moyenne, qui sépare les deux actions contraires dont le cylindre de fer est maintenant animé; et dès l'instant que l'on retire le barreau, la limaille n'a plus

aucune tendance, ni à s'arranger ni à conserver son arrangement primitif; ce qui prouve assez que le fer perd ses propriétés dès qu'il n'est plus sous l'influence de l'aimant. En modifiant cette expérience, on peut prouver que ce n'est pas seulement au contact que le fer reçoit de l'aimant la propriété magnétique, mais qu'il la reçoit à distance, comme on le voit dans la *figure* 4.

Ainsi le fer contient, comme l'aimant, les deux fluides magnétiques; mais ces deux fluides y sont *combinés*, c'est-à-dire neutralisés l'un par l'autre. C'est pourquoi le fer n'agit pas magnétiquement sur le fer, car ce qui est attiré par l'un des fluides est repoussé par l'autre avec une force égale, et l'action définitive est tout-à-fait nulle. Au contraire, quand il est soumis à l'action de l'aimant, ses deux fluides sont *décomposés;* l'un est attiré, l'autre repoussé; une séparation s'opère entre eux; le premier afflue du côté de l'aimant, l'autre afflue à l'extrémité opposée de la masse de fer, et là il devient prédominant au point d'attirer la limaille qu'on lui présente. Voilà comment nous concevons que l'état naturel du fer ne soit autre chose qu'un état de combinaison ou de neutralisation de ses deux fluides magnétiques, et que son état magnétique résulte d'une séparation plus ou moins complète des deux fluides par l'attraction et la répulsion qu'ils éprouvent de la part de l'aimant. Cependant le phénomène de décomposition des fluides magnétiques pouvant se produire de plusieurs manières, nous devons chercher à reconnaître si ces fluides éprouvent réellement dans la substance du fer un mouvement de translation par lequel ils passent d'une extrémité à l'autre de sa masse, ou s'ils n'éprouvent qu'un déplacement moléculaire.

295. *Le fluide magnétique ne passe pas de l'aimant au fer, ni même d'une molécule de fer à la molécule voisine.* — Avec un aimant on peut aimanter des morceaux de fer aussi long-temps et aussi souvent que l'on veut, sans qu'il perde rien de sa propriété attractive; donc par cette opé-

ration l'aimant ne perd pas son fluide pour le donner au fer, puisqu'à la longue il finirait par s'épuiser. De plus, on peut remarquer qu'un morceau de fer qui devient aimant pendant tout le temps qu'il touche un véritable aimant, ne conserve, quand on l'en sépare, aucune trace de ses propriétés magnétiques : donc il ne lui a rien pris, puisqu'il n'a rien gardé. Enfin, et cette observation est encore plus décisive, le cylindre de fer qui touche l'aimant ayant une ligne moyenne et deux pôles, c'est une preuve qu'il possède les deux fluides, et sans doute il n'en pourrait recevoir qu'un seul de l'aimant si c'était l'aimant qui le lui donnât. Ainsi le fer possède lui-même les deux fluides magnétiques ; ils sont à l'état neutre dans sa substance, et la présence de l'aimant les sépare, en attirant l'un et repoussant l'autre ; voilà pourquoi le fer est attiré indifféremment par les deux pôles, tandis qu'il devrait être repoussé par tous deux s'il partageait leur fluide. Il en est de même de tous les corps magnétiques, considérés dans leur état naturel ; ils ne sont magnétiques que parce qu'ils possèdent les deux fluides, et ils ne sont à l'état naturel que parce que les deux fluides sont neutralisés ou dissimulés l'un par l'autre.

Un caractère essentiel du magnétisme c'est qu'il n'est pas transmissible, et ne peut par aucune cause sortir du corps qui le contient. On pourrait penser que du moins il est dans le corps comme dans un vase fermé de toutes parts, et que s'il ne peut se transmettre au-dehors, il peut se déplacer au dedans, et se porter tantôt dans un point, tantôt dans l'autre, et s'y accumuler, suivant les forces qui le sollicitent. Cependant nous allons voir qu'il n'en est pas ainsi ; car si l'on met un fil de fer en contact avec un aimant, et que l'on en coupe l'extrémité pendant que les fluides sont décomposés, l'un paraissant en haut et l'autre en bas, on ne retrouve pas la moindre trace de magnétisme dans la partie que l'on détache. Les apparences sont donc trompeuses, et il faut bien se garder de croire que le

fluide magnétique puisse être décomposé comme le fluide électrique, et qu'il puisse voyager d'un bout à l'autre du fil qui le contient. Ce résultat semble un paradoxe inexplicable; mais, avec un peu d'attention, l'on peut concevoir, comme nous le démontrerons, que la décomposition magnétique a lieu dans chaque molécule séparément, que c'est dans cette petite étendue que le fluide peut se mouvoir, de telle sorte qu'il faudrait couper en deux une molécule elle-même, pour pouvoir parvenir à isoler l'un de l'autre les deux fluides magnétiques. Voilà le principe des considérations par lesquelles nous pourrons expliquer le phénomène dont il s'agit, ainsi que le phénomène des aimans que l'on brise, et dont chaque moitié devient à l'instant un aimant entier.

296. *L'acier prend toutes les propriétés magnétiques des aimans.* — La limaille d'acier n'est guère moins attirable que la limaille de fer; elle s'attache aux aimans, et forme aussi de petits filets ou de petites houppes d'une longueur très-sensible. Les fils d'acier qui n'ont d'épaisseur que quelques fractions de millimètre sont encore assez comparables aux fils de fer de mêmes dimensions; seulement ils sont plus lents à recevoir l'action magnétique. Mais les morceaux d'acier d'un volume un peu considérable, et surtout les morceaux d'acier fortement trempé, présentent des propriétés tout-à-fait distinctes de celles du fer, car ils paraissent d'abord ne recevoir des aimans aucune espèce d'influence. On s'en assure en essayant de répéter, avec de petits cylindres d'acier trempé, l'expérience qui est indiquée dans la *figure* 10. Le premier cylindre ne pourra pas s'attacher à l'aimant, et il sera impossible de former avec l'acier la chaîne magnétique qui se forme si facilement avec le fer. Cependant les petits fragmens d'acier étant attirables, il est naturel de supposer qu'en prenant du volume cette substance ne perd pas complètement sa sensibilité magnétique, et qu'il suffit seulement de quelques précautions pour la rendre apparente

autant qu'elle doit l'être. En effet, que l'on mette l'acier en contact avec l'aimant, et que l'on maintienne ce contact pendant un quart d'heure ou une demi-heure, on observe alors un phénomène remarquable : ce corps, qui semblait au premier instant si insensible au magnétisme, devient magnétique avec le temps; il prend de la force de plus en plus, et à la fin il est attiré aussi puissamment que le fer. On peut même par un autre moyen suppléer au temps qui paraît nécessaire pour développer sa force; ce moyen consiste à exercer plusieurs *touches*, c'est-à-dire, plusieurs frictions dans *le même sens*, sur toute la longueur du morceau d'acier, soit en le faisant passer sur l'aimant, soit en faisant passer l'aimant sur lui. Par exemple, en traitant de la sorte les petits cylindres dont nous parlions tout à l'heure, et sur lesquels l'aimant n'avait pas de prise, on les voit, après quelques frictions, s'attacher à sa surface, s'attacher l'un à l'autre, et former enfin une chaîne magnétique qui se prolonge comme celle des cylindres de fer. Le premier caractère de l'acier trempé est donc d'exiger, pour devenir magnétique, ou un contact prolongé avec un aimant, ou des frictions répétées. Un second caractère, très-digne de remarque, c'est qu'après ces opérations il conserve *pour toujours* le magnétisme qu'il a pris. Pour preuve de cette vérité, il suffit de rouler dans la limaille l'acier qui a été *touché* par un aimant : on y reconnaît alors une ligne moyenne et deux pôles, et, en un mot, toutes les propriétés qui distinguent les aimans; qu'on l'essaie encore après un jour ou un mois, ou même après des années, on verra qu'il n'a rien perdu de sa force; enfin que l'on mette en présence, pour les faire agir l'un sur l'autre, les pôles de même nom de ces *aimans artificiels*, ou leurs pôles de nom contraire, on verra que les premiers se repoussent et que les autres s'attirent exactement comme le font les pôles des aimans naturels.

Du premier caractère que présente l'acier, c'est-à-dire

de la lenteur avec laquelle il cède à l'action des aimans, on conclut qu'il y a dans sa substance une force ou plutôt une sorte de résistance qui s'oppose à la séparation immédiate de ses fluides magnétiques, et, cette force, on l'appelle *force coercitive*. Du second caractère qu'il présente, c'est-à-dire de la faculté avec laquelle il conserve le magnétisme qu'il a pu recevoir, on conclut qu'il y a aussi dans sa substance une force ou une résistance qui s'oppose à la réunion des deux fluides séparés; car les fluides contraires s'attirent, et tendent sans cesse à se recomposer ou à se neutraliser; et s'il n'y avait pas une force qui s'y opposât, les deux fluides se recomposeraient en effet, et l'acier retomberait à l'état naturel dès qu'il serait séparé de l'aimant qui exerce sur lui son action décomposante. Cette résistance à la recomposition des fluides s'appelle encore *force coercitive*, comme la résistance à leur séparation. Ainsi l'on admet, sans toutefois en avoir une preuve certaine, que, si les fluides magnétiques ont, dans certains corps, quelque résistance, quelque frottement, ou en général quelques obstacles à vaincre pour s'écarter l'un de l'autre, ils doivent rencontrer les mêmes obstacles pour revenir l'un à l'autre et reprendre leur place naturelle.

La force coercitive est très-différente dans les aciers de différente espèce, et elle est plus variable encore par les modifications particulières que reçoit cette substance que par les proportions chimiques des élémens qui la constituent. On sait que l'acier n'est autre chose que du fer auquel se trouve combinée une très-faible quantité de charbon, et le plus souvent aussi quelques atomes de silicium. D'après les analyses les plus exactes, il paraît que le charbon n'y entre que pour six à sept millièmes du poids total.

La qualité du fer et les petites variations que peuvent éprouver les proportions de carbone ont sans doute une influence très-marquée sur les propriétés de l'acier. Mais tout le monde sait qu'avec une même pièce de ce métal on

peut faire des outils tranchans de toute espèce, des ressorts très-élastiques, des burins à graver ou des coins à frapper la monnaie, qui sont cassans comme du verre. Toutes ces propriétés si diverses, et en apparence si contradictoires dans un corps qui est chimiquement le même, ne dépendent que d'un certain arrangement des molécules, qui est déterminé par des opérations mécaniques ou par l'influence de la chaleur. A chaque arrangement moléculaire, et aussi à chaque température, correspondent des propriétés magnétiques différentes : voilà pourquoi la force coercitive est si variable dans l'acier. Nous ferons plus loin une étude particulière de ces modifications, et, pour cet instant, nous nous contenterons de remarquer, 1° que l'acier qui a reçu la trempe la plus roide, est en général celui qui a la force coercitive la plus grande; 2° que la trempe des ressorts donne déjà une force coercitive en vertu de laquelle l'acier conserve très-bien son magnétisme; 3° qu'en général le fer prend lui-même une force coercitive lorsqu'il est battu, tordu, écroui ou tourmenté en différens sens. Mais, pour le distinguer, nous appelons *fer doux* celui qui n'a point de force coercitive.

Il résulte de ce qui précède que nous pouvons fabriquer des aimans tout-à-fait pareils aux aimans naturels, et nous en tirerons cet avantage, que, étant maîtres de varier à volonté les dimensions et les formes, nous pourrons les approprier à nos recherches. Les aimans artificiels prennent des noms différens. Une *aiguille aimantée* (*Fig.* 12) a en général la forme d'un losange. Elle est destinée, tantôt à être posée sur un pivot d'acier très aigu, au moyen d'une chape en agate c, tantôt à être suspendue par un fil de soie d'un seul brin, ou par un assemblage de fils de soie sans torsion. Quelquefois l'aiguille aimantée est un simple fil d'acier, un cylindre ou un prisme allongé. Quand les dimensions de l'aiguille sont un peu considérables, soit en longueur, soit en épaisseur, il ne suffit plus de la passer

sur l'aimant pour lui donner tout le magnétisme qu'elle peut recevoir, il faut recourir alors à des procédés particuliers que nous ferons connaître en détail dans le chapitre de l'aimantation.

Une aiguille de grandes dimensions s'appelle un *barreau aimanté*, ou simplement un *barreau*.

La réunion de plusieurs aiguilles ou de plusieurs lames aimantées ayant toutes les pôles de même nom tournés dans le même sens, forme un *faisceau aimanté* ou un *faisceau magnétique*.

297. *Des diverses substances magnétiques et de leur force coercitive.* — Le fer et l'acier ne sont pas, avec l'aimant, les seules substances magnétiques que nous connaissions; le fer est un métal et un corps simple chimiquement, l'acier est un composé de fer et de carbone, l'aimant un composé de fer et d'oxigène; et puisqu'on ne trouve aucune trace de magnétisme ni dans le carbone ni dans l'oxigène, on est porté à croire 1° que le fluide magnétique tient à la substance du fer, et 2° qu'il est emporté avec les atomes de ce métal dans toutes les combinaisons chimiques auxquelles ils sont soumis. D'après cela, on peut s'attendre à retrouver des propriétés magnétiques plus ou moins apparentes dans toutes les substances ferrugineuses, soit que le fer y entre comme principe accidentel par voie de mélange, soit qu'il y entre comme principe essentiel et par voie de combinaison. En effet, la fonte, la plombagine, les oxides et les sulfures de fer, exercent une action plus ou moins sensible sur l'aiguille aimantée. Nous verrons, dans l'un des chapitres suivans, les moyens délicats par lesquels on découvre ces actions quand elles sont trop faibles pour mettre en mouvement l'aiguille ordinaire. Il paraît cependant que certains corps sont bien plus efficaces que d'autres pour atténuer les propriétés magnétiques du fer, en se combinant avec lui.

Le *nickel*, qui a été découvert par Cronstedt vers 1750,

et obtenu à l'etat de pureté par Bergman en 1775, et le *cobalt*, qui fut obtenu par Brandt dès 1733, sont deux autres métaux ayant des propriétés magnétiques analogues à celles du fer. On a cru long-temps que le magnétisme de ces corps pouvait tenir à la présence du fer; mais les travaux de plusieurs chimistes, et particulièrement de Sage et de M. Thénard, ne laissent aucun doute sur ce sujet. Le nickel et le cobalt sont des corps simples; ils peuvent être purifiés au point de ne contenir que des traces des autres métaux auxquels ils sont naturellement unis, et il est certain que ces atomes étrangers sont tout-à-fait incapables de leur donner les propriétés magnétiques qu'ils manifestent. Voilà donc deux autres substances élémentaires contenant, comme la substance du fer, les deux fluides magnétiques combinés. Ces substances peuvent aussi, suivant les préparations qu'elles ont reçues, suivant les actions mécaniques qu'elles ont subies, et suivant les élémens étrangers qu'elles contiennent, se présenter comme le fer doux, sans aucune force coercitive, ou comme le fer écroui et l'acier, avec des forces coercitives plus ou moins marquées.

Le chrôme et le manganèse sont encore deux autres métaux magnétiques; mais le manganése n'est magnétique, comme nous le verrons plus tard, que lorsqu'il est refroidi à 15 ou 20° au dessous de zéro.

298. *Moyen de reconnaître si une substance est simplement magnétique ou si elle est aimantée.* — Un corps aimanté a nécessairement des pôles différens, car nous avons déjà dit (292) qu'il est impossible d'isoler un des pôles d'un aimant, et par conséquent d'isoler un des fluides; les pôles de nom contraire ayant une action contraire sur le même pôle d'une aiguille aimantée, il suffira donc de présenter tous les points d'un corps au même pôle d'une aiguille pour reconnaître son état. Si l'action est toujours nulle, le corps n'a point de magnétisme sensible; si elle est toujours attractive, le corps est simplement magnétique; si elle est attractive pour quel-

ques points et répulsive pour d'autres, le corps est aimanté; il a deux pôles contraires et une ligne moyenne dont on peut trouver la trace.

Il arrive quelquefois qu'un même corps présente plus de deux pôles; alors on dit qu'il a des *points conséquens*. Par exemple, l'aiguille représentée dans la *figure* 15 offre deux points conséquens : l'un en *a*, l'autre en *b*. Pour en reconnaître la présence, il suffit de la faire agir sur une petite aiguille d'épreuve comme celle de la *figure* 12. Celle-ci étant horizontale, on approche l'autre aiguille verticalement, et on la fait monter ou descendre de manière que tous ses points passent successivement devant le même pôle de l'aiguille mobile : s'il n'y a pas de point conséquent, l'on n'observe qu'une attraction et une répulsion; s'il y a un point conséquent, on observe deux alternatives. Par exemple, une attraction d'abord, puis une répulsion, puis une autre attraction : s'il y a deux points conséquens, on observe trois alternatives, etc.; car, dans un aimant qui présente des points conséquens, chaque pôle touche toujours à un pôle de nom contraire, et les alternatives d'attraction et de répulsion se suivent régulièrement.

Les points conséquens peuvent encore être rendus visibles, soit en plongeant l'aimant dans la limaille, soit en le mettant sous une feuille de carton ou de papier sur laquelle on tamise de la limaille très-fine. C'est la seconde de ces expériences qui est représentée dans la *figure* 15. Nous verrons plus loin comment les pôles multiples peuvent s'établir dans les aiguilles, et comment on peut les faire disparaître et les éviter; ce qui est d'une grande importance dans la construction des boussoles.

CHAPITRE II.

De l'action magnétique de la terre.

299. *Direction des aimans.—Déclinaison.—Inclinaison.* — Une aiguille aimantée, suspendue horizontalement par un fil de soie, ou posée sur un pivot, n'est pas en équilibre dans toutes les positions, comme serait une aiguille sans magnétisme; mais elle prend une direction déterminée vers un point de l'horizon, et si on l'en écarte, elle y revient par une série d'oscillations plus ou moins rapides. La force qui la rappelle est une force magnétique, car une aiguille non aimantée n'éprouve rien de pareil. Au premier instant, on pourrait supposer que cette direction n'est qu'un phénomène local qui dépend peut-être de quelques masses de fer ou de quelques aimans situés dans le voisinage; car il ne faut en effet qu'une aiguille à coudre ou un bout de fil de fer pour attirer l'aiguille aimantée hors de cette position et pour la maintenir dans une autre, et rien ne s'oppose à ce que des masses plus fortes, agissant de plus loin, ne la sollicitent et ne la dirigent dans un sens déterminé. Mais ce phénomène se rèpète partout. Les voyageurs ont porté l'aiguille aimantée dans toutes les contrées de la terre, et il n'est pas un lieu où elle ne prenne une direction fixe, à laquelle elle revient sans cesse lorsqu'on l'en écarte. Dans les régions polaires comme dans celles de l'équateur, au sommet des plus hautes montagnes comme dans les mines les plus profondes, partout l'aiguille aimantée jouit de cette propriété remarquable. Il y a donc une force magnétique qui fait sentir ses effets dans tous les points du globe ter-

restre; car une action directrice est nécessairement relative, comme sont toutes les actions à distance; et un corps ne peut pas plus se diriger par lui-même que se mouvoir par lui-même. Dans un cas comme dans l'autre, il y a hors de lui une force qui le sollicite.

Nous pouvons reconnaître, par une expérience facile, que cette force a le caractère essentiel de la force qui émane d'un aimant et non pas de celle qui émane d'une masse de fer; car si l'on renverse les pôles de l'aiguille en la retournant *bout à bout*, elle n'est plus en équilibre dans cette nouvelle position; elle fait une pirouette, et décrit d'un côté ou de l'autre toute la demi-circonférence qui l'écarte de sa direction primitive. Donc la force directrice distingue les pôles, et, semblable aux aimans, elle agit par attraction sur l'un et par répulsion sur l'autre, tandis que le fer attire l'un ou l'autre, sans distinction, et avec la même énergie.

Où se trouve le centre de cette action magnétique, si universellement répandue sur tous les points de la terre? C'est une question qui paraît difficile à résoudre, et qui fut autrefois un grand sujet de discussion parmi les physiciens. Les uns mettaient, avec Cardan, le siége de cette force dans une petite étoile qui forme la queue de la grande ourse; les autres le plaçaient au pôle du zodiaque; et même il y en eut qui, trouvant sans doute le ciel trop étroit, imaginaient par delà les cieux et les étoiles un centre attractif d'où arrivait à la terre la force qui dirige les aimans. Mais Gilbert, le premier fondateur de la science du magnétisme et de l'électricité, mit un terme à toutes ces vaines hypothèses en démontrant, autant qu'on pouvait le faire à son époque, que le globe de la terre est magnétique, et que c'est son action qui dirige l'aiguille aimantée (1).

(1) Gilbert écrivait vers la fin du seizième siècle, et son Traité *de Magnete magneticisque corporibus, et magno magnete tellure*, est un vrai

En discutant les observations qui ont été faites dans les différens climats, nous serons en effet conduits, par leur ensemble, à regarder la terre comme un vaste aimant, ayant sa ligne moyenne située vers l'équateur, et ses pôles situés près des pôles de rotation. Tellement que le globe entier, roulé dans la limaille, nous offrirait à peu près l'apparence des aimans dont nous avons parlé dans le n° 291 et dans les *figures* 1 et 2. Ainsi, par rapport au magnétisme, la terre a aussi deux régions, l'une australe et l'autre boréale; mais elles ne coïncident pas avec les régions astronomiques de même dénomination, parce que la ligne moyenne qui les sépare ne coïncide pas exactement avec l'équateur astronomique. Cependant on en tire un moyen de caractériser et de définir chacun des fluides magnétiques; on appelle *fluide boréal* celui qui domine dans la région boréale de la terre, et *fluide austral* celui qui domine dans la région australe; et puisque ce sont les fluides de nom contraire qui s'attirent, il en résulte que c'est le pôle *austral* d'une aiguille qui se dirige vers le *nord* et son pôle *boréal* vers le *sud*.

Dans le même lieu les aiguilles aimantées qui sont assez distantes pour ne pas réagir l'une sur l'autre prennent des directions sensiblement parallèles; mais sur des points de la terre qui sont éloignés de quelques degrés en longitude ou en latitude, ce parallélisme n'existe plus; il importe par conséquent de pouvoir définir la direction de l'aiguille ai-

---

modèle d'invention et de sagacité : voici ce qu'il dit au troisième livre de cet ouvrage, ch. 1, pag. 116 de l'édition de 1628, en parlant des aiguilles qui se dirigent : *Nunc vero harum rerum causæ et admirabiles efficientiæ, antea conspicuæ, sed non demonstratæ, nobis aperiendæ sunt. De hisce conversionibus qui ante nos scripserunt omnes, tam breviter, tam jejune et ancipiti judicio, opiniones suas tradiderunt, ut nemini vix unquam persuadere, nedum ipsis satisfacere posse videantur, et a prudentioribus, omnes eorum ratiunculæ, tanquam inutiles, incertæ, et absurdæ, nullis demonstrationibus aut argumentis suffultæ, rejiciuntur, unde et neglecta magis incomprehensa exulavit magnetica scientia.*

mantée, c'est-à-dire de pouvoir la rapporter à des lignes connues et invariables, afin de reconnaître dans le même lieu, 1° quels sont les changemens que cette direction éprouve avec le temps, et, 2° quels sont les rapports qui existent entre les directions que l'on observe dans les lieux différens. Voici à cet égard quelques définitions géométriques qu'il importe de bien saisir.

Le *méridien magnétique* est le plan qui passe par le centre de la terre et par la direction de l'aiguille horizontale, ou simplement la *trace* que ferait ce plan sur la surface de la terre. On sait que le *méridien terrestre* ou le *méridien astronomique* d'un lieu est le plan qui passe par ce lieu et par l'axe de la terre, et que la *ligne méridienne*, ou simplement la *méridienne*, est la *trace* de ce plan sur la surface terrestre. Le méridien magnétique et le méridien astronomique sont deux plans verticaux, puisqu'ils passent l'un et l'autre par le centre de la terre, ou plutôt par la verticale du lieu pour lequel on les considère; mais ces deux plans verticaux peuvent faire entre eux un angle plus ou moins grand.

La *déclinaison* de l'aiguille aimantée est dans chaque lieu l'angle que fait le méridien magnétique avec le méridien astronomique, ou, ce qui revient au même, l'angle que la direction de l'aiguille horizontale fait avec la méridienne. La déclinaison est *orientale* quand le pôle austral de l'aiguille passe à l'est de la méridienne, et *occidentale* quand il passe à l'ouest. Par exemple, SN (*Fig.* 11) est la méridienne de l'Observatoire de Paris, et AB la direction de l'aiguille horizontale au même lieu; la déclinaison est occidentale, et se trouve à présent d'environ 22°, car nous verrons qu'elle change avec le temps. Il y a des lieux sur la la terre où l'aiguille se dirige exactement suivant la méridienne : pour ces lieux la déclinaison est nulle, et l'ensemble des points successifs dans lesquels ce phénomène se présente forme ce qu'on appelle des lignes *sans déclinaison*.

Nous verrons que d'un pôle à l'autre il existe au moins deux lignes sans déclinaison, qui traversent les mers et les continens dans des directions tout-à-fait sinueuses et irrégulières.

Tout appareil propre à observer la déclinaison s'appelle *boussole de déclinaison.* Dans nos climats et presque par toute la terre, l'aiguille de déclinaison se rapprochant plus des points cardinaux du nord et du sud que de l'est et de l'ouest, on dit communément qu'elle se dirige vers le nord.

L'*inclinaison* est l'angle que fait avec l'horizon une aiguille qui peut se mouvoir librement autour de son centre de gravité dans le plan vertical du méridien magnétique. Concevons une aiguille A C B (*Fig.* 13) mobile autour d'un axe central C, et pouvant parcourir toute une circonférence dans le plan vertical Z C H; si ce plan de rotation coïncide avec le méridien magnétique, l'angle A C H sera l'inclinaison du lieu. A Paris, l'inclinaison est d'environ 70°, et c'est le pôle austral qui plonge au dessous de l'horizon. L'aiguille, il est vrai, fait avec l'horizon quatre angles, qui sont égaux, deux à deux; mais on convient toujours de prendre pour l'inclinaison le plus petit des deux angles qu'elle forme, et même pour fixer les idées, le plus petit des angles que forme sa moitié inférieure; ainsi l'inclinaison est toujours plus petite que 90_0.

Les appareils propres à observer l'inclinaison s'appellent *boussoles d'inclinaison.*

Si, par exemple, on part de Paris avec un appareil de cette nature pour s'avancer vers le pôle boréal de la terre, on observe que l'inclinaison augmente en même temps que la latitude, et les voyageurs qui, au milieu des glaces, ont pénétré jusqu'aux régions polaires, ont trouvé des inclinaisons très-voisines de 90°; c'est-à-dire que là l'aiguille d'inclinaison se redresse et s'approche de la verticale. Il y a donc dans ces parages certains points où l'aiguille

d'inclinaison doit coïncider exactement avec le fil à plomb : jusqu'à présent aucun voyageur n'a pu dresser ses appareils et faire ses expériences dans ces points précis, que l'on appelle par analogie les *pôles magnétiques* de la terre; mais on sait cependant, d'une manière certaine, que les pôles magnétiques sont à plusieurs centaines de lieues du pôle de rotation, et tout annonce qu'il y en a deux dans l'hémisphère boréal.

Au contraire, si l'on part de Paris pour s'avancer vers le pôle austral de la terre, l'inclinaison diminue avec la latitude. Enfin, lorsqu'on arrive dans la zône équatoriale, on trouve un certain point où l'inclinaison est tout-à-fait nulle, c'est-à-dire où l'aiguille d'inclinaison est exactement horizontale. En passant outre, on retrouve une autre inclinaison; mais alors, c'est le pôle boréal de l'aiguille qui plonge au dessous de l'horizon, et qui plonge de plus en plus à mesure que la latitude australe augmente. Il y a donc vers le pôle austral de la terre d'autres points où l'aiguille d'inclinaison se releverait exactement dans la direction du fil à plomb, son pôle boréal en bas et son pôle austral vers le zénith, et ces points, dont la position précise est encore inconnue, sont les autres *pôles magnétiques* de la terre; tout annonce qu'il y en a deux au midi comme au nord.

Quel que soit le méridien sur lequel on traverse la zône équatoriale, on trouve toujours un point où l'aiguille est horizontale, et la série de ces points *sans inclinaison* forme autour de la terre une courbe que l'on appelle *l'équateur magnétique*. Cette courbe est régulière dans une partie de son cours, et alors elle suit très-sensiblement la direction d'un grand cercle qui serait incliné à l'équateur terrestre, de 12° à 13°, et qui le couperait d'une part, à l'ouest de la côte occidentale d'Amérique, vers l'île Galego, et d'une autre part vers la côte occidentale d'Afrique, en s'inclinant du côté du sud, dans la partie de l'Océan atlantique qui sépare ces deux points; mais des observations répétées

indiquent en même temps que l'équateur magnétique éprouve dans la mer du Sud, entre les îles Sandwich et les îles des Amis, des sinuosités nombreuses dont il est difficile de rendre compte.

300. *Points d'application de la force magnétique de la terre.* — Puisque la force magnétique de la terre agit à la manière des aimans, pour diriger l'aiguille aimantée, il est certain qu'elle attire l'un des pôles et qu'elle repousse l'autre; car c'est une loi générale du magnétisme, que si une force n'agit pas indifféremment sur les deux pôles comme le fait le fer doux, elle agit toujours sur l'un d'eux par attraction, et sur l'autre par répulsion. Or, sans rien savoir sur cette force magnétique terrestre, il suffit de remarquer qu'elle est une force universelle agissant dans tous les points du globe, pour conclure que son siége ou plutôt son centre d'action est à une distance infinie, par rapport aux dimensions des aiguilles ou des aimans qui servent à nos expériences, et que par conséquent elle peut, sans erreur, être considérée comme parallèle à elle-même, dans toute l'étendue de ces corps. Par l'action qu'elle exerce sur toutes les molécules de fluide austral qui sont répandues d'un côté de la ligne moyenne d'un aimant, elle compose donc un système de forces parallèles entre elles; et par l'action qu'elle exerce sur toutes les molécules du fluide boréal qui sont répandues de l'autre côté de la ligne moyenne, elle compose un autre système de forces parallèles entre elles et parallèles aux premières.

Ces deux systèmes, l'un attractif et l'autre répulsif, donnent naissance chacun à une résultante unique, dont on peut déterminer la direction, l'intensité et le point d'application, d'après les principes que nous avons posés (21 et 22).

1°. *Pour la direction.* Chaque résultante étant parallèle aux composantes qui la produisent, on voit que nos deux résultantes sont parallèles entre elles, et qu'ainsi toute

l'action magnétique de la terre se réduit à un *système de deux forces parallèles et opposées.*

2°. *Pour l'intensité.* Chaque résultante étant égale à la somme des composantes qui la produisent, on voit que nos deux résultantes seront toujours égales en intensité, si dans un aimant quelconque la quantité de fluide austral est toujours égale à la quantité de fluide boréal. Or, le développement du magnétisme n'étant que la séparation de ces fluides contraires, et chacun d'eux restant enfermé dans la substance de l'aimant sans en pouvoir sortir, il est évident que cette condition est toujours remplie, et que la résultante australe est toujours de même intensité que la résultante boréale. Les deux résultantes étant *parallèles*, *opposées* et *égales*, elles forment donc un *couple*, dont l'intensité est dépendante à la fois, de la vigueur de l'aimant, et de l'énergie de la force magnétique de la terre.

Cette vérité fondamentale : qu'un aimant éprouve de la part de la terre une répulsion et une attraction qui sont toujours égales, et qu'il est par conséquent toujours dirigé sans être jamais ni attiré ni repoussé, peut être confirmée par deux expériences curieuses. La première consiste à peser une aiguille avant de l'aimanter, et de la peser ensuite après lui avoir donné toute la puissance magnétique qu'elle peut recevoir; l'égalité absolue de ces deux pesées successives est une preuve que la force terrestre ne donne lieu à aucune résultante verticale, car une telle résultante produirait une augmentation de poids si elle agissait de haut en bas, et une diminution si elle agissait de bas en haut.

La seconde expérience fait voir qu'il n'y a pas non plus de résultante horizontale : elle consiste à faire flotter une aiguille aimantée sur la surface de l'eau, en la posant sur un léger morceau de liége qui n'offre que peu de résistance au mouvement. S'il y avait une résultante horizontale, elle entraînerait l'appareil toujours dans le même sens jusqu'à la rencontre d'un obstacle qui fût capable de l'arrêter;

mais on n'observe aucun mouvement de cette espèce, l'aiguille se dirige, et une fois qu'elle est dirigée, elle reste en repos au milieu de la surface liquide sans éprouver la moindre tendance d'un côté ou de l'autre.

L'absence de tout mouvement de translation, et par conséquent de toute résultante dans le sens horizontal, peut encore se démontrer par un appareil plus délicat. On suspend à un fil sans torsion une bande de carton ou une petite planchette très-légère (*Fig.* 7); quand l'équilibre est établi, la planchette étant bien horizontale, on pose d'un côté une aiguille aimantée AB, et de l'autre un petit contre-poids P pour conserver le niveau, et l'on observe que l'aiguille se place toujours dans le méridien magnétique. Or, s'il y avait une force horizontale, quelque petite qu'elle fût, elle ferait tourner le levier autour du fil de suspension, et l'aiguille, suspendue de cette manière, ne pourrait plus prendre la direction qu'elle prend lorsqu'elle est directement posée sur un pivot ou suspendue par son centre de gravité.

3°. *Pour le point d'application.* Les points d'application des deux résultantes magnétiques de la terre ou du couple terrestre, ne peuvent être déterminés dans un aimant que lorsqu'on connaît la distribution du magnétisme de part et d'autre de sa ligne moyenne. Les aiguilles dont on se sert dans les expériences sont en général symétriques par rapport à un axe longitudinal et par rapport à un plan transversal, car elles ont presque toujours la forme d'un cylindre, ou d'un prisme, ou d'un losange très-allongé, ou quelque autre forme analogue; et quand l'aimantation est régulière, la ligne moyenne la divise en deux parties égales, et dans chaque moitié les fluidés contraires se trouvent distribués exactement de la même manière. Dans cette hypothèse, il est évident que les points d'application des deux résultantes terrestres se trouvent sur l'axe de figure et à la même distance des extrémités de l'aiguille; c'est-à-dire

qu'ils sont eux-mêmes symétriquement placés par rapport à la ligne moyenne; voilà ce qui regarde leur position relative.

Quant à leur position absolue nous ne la déterminerons que dans l'un des chapitres suivans; nous nous contenterons de remarquer ici que, dans tous les cas, l'intensité magnétique augmentant à mesure que l'on s'éloigne de la ligne moyenne, le point d'application de chaque résultante est plus près des extrémités de l'aiguille que de son milieu.

Ces deux points d'application des résultantes terrestres s'appellent les *deux pôles* de l'aimant; dans ce sens les pôles sont à l'égard du magnétisme ce qu'est le centre de gravité à l'égard de la pesanteur. La ligne qui joint les pôles s'appelle l'*axe* de l'aimant. Dans la supposition que nous avons faite d'une aimantation parfaitement régulière, l'axe magnétique coïnciderait avec l'axe de figure; mais dans la pratique il se présente toujours quelque cause accidentelle qui dérange ces conditions mathématiques; et comme la direction d'un aimant ou d'une aiguille est la direction de son axe magnétique, il ne faudrait pas prendre pour elle la direction de l'axe de figure. Il importe d'écarter cette cause d'erreur, et l'on y parvient par la méthode suivante, que l'on appelle la *méthode du retournement*.

Soit une aiguille horizontale E m, E′ m' (*Fig.* 14), dont les pôles sont irrégulièrement placés, l'un en A, l'autre en B; dans sa position d'équilibre, son axe de *figure a a′* fera, par exemple, avec la ligne méridienne du lieu un angle aCN, tandis que son axe magnétique fait un angle AKN; si l'on retourne les faces sans en retourner les pôles, et qu'on l'abandonne de nouveau à elle-même, elle s'arrêtera dans la position E_1 E'_1, de manière que l'axe A_1 B_1 soit parallèle à AB, car telle est la condition d'équilibre; alors l'axe de *figure* a_1 a'_1 fait avec la méridienne un angle a_1 C N beaucoup plus grand que tout à l'heure, tandis que l'axe magnétique fait le même angle; et il est facile de voir que la

moyenne des angle a C N et a_1 C N est précisément l'angle M C N, c'est-à-dire la déclinaison cherchée. C'est ainsi qu'il faut toujours observer la déclinaison, *par la méthode du retournement*, sous peine de commettre des erreurs qui s'élèvent ordinairement à plusieurs degrés.

La *direction* de la force magnétique de la terre est maintenant facile à définir et à trouver, car elle est donnée par l'aiguille d'inclinaison. En effet, quand cette force agit seule sur une aiguille, elle ne peut la laisser en repos qu'après en avoir amené l'axe ou la ligne des pôles dans sa propre direction; et, pour qu'elle agisse seule sans être combattue ni par la pesanteur ni par aucune résistance, il faut que l'aiguille soit suspendue par son centre de gravité, et qu'elle puisse se mouvoir dans le plan du couple, double condition qui se trouve remplie dans la boussole d'inclinaison, lorsqu'elle est bien faite et lorsqu'elle est exactement tournée dans le plan du méridien magnétique. Nous allons nous occuper des instrumens qui servent à observer la direction horizontale et la direction vraie de la force terrestre, et de toutes les précautions qui sont nécessaires pour écarter les causes d'erreur qui se présentent dans ces observations délicates.

301. *Boussole de déclinaison.* — Cet instrument est représenté dans les *Figures* 16, 17, 20 et 21.

gg' (*Fig.* 21) est l'aiguille de la boussole; ses pôles sont en a et b_1; vers son centre elle est percée d'une ouverture t de 7 à 8 millimètres de diamètre, afin qu'elle puisse facilement être soumise à la méthode du retournement : elle est équilibrée d'elle-même sans contre-poids, et par conséquent elle ne pourrait plus se tenir horizontale si elle était désaimantée.

cc' (*Fig.* 20) est une coupe de la chape en agate. Cette pièce doit être travaillée avec un grand soin, surtout à son sommet intérieur, où est la petite surface courbe qui doit reposer sur la pointe du pivot p, et à son

contour extérieur, où vient s'ajuster l'ouverture centrale de l'aiguille.

Le pivot *p* a sa pointe travaillée sous un angle de 15 à 20°. (*Voyez* Coulomb, sur le Frottement des Pivots, Mém. de l'Inst., t. III.) L'anneau *aa'* est destiné à soulever la chape de l'aiguille, soit pour décharger le pivot quand l'appareil n'est pas en expérience, soit pour arrêter des oscillations d'une trop grande amplitude. La tige de cet anneau se prolonge jusqu'à l'extérieur de la boîte, où elle s'ajuste à un bouton qui l'élève ou qui l'abaisse à volonté.

La *Figure* 17 représente la coupe de la boussole,

gg' est l'aiguille;

dd' un cercle divisé sur lequel on lit la division correspondante aux extrémités de l'aiguille;

bb' le bord de la boîte, qui est en cuivre rouge, comme tout le reste de l'appareil;

vv' le verre qui ferme la boîte, pour éviter l'agitation de l'air;

xy un axe solide qui fait corps avec le fond de la boîte, et qui peut tourner sur son extrémité conique inférieure dans une petite cavité de la vis *w*.

Cette rotation emporte l'axe, la boîte et toutes les pièces adhérentes. Mais en même temps le pied de l'instrument reste fixe, ainsi que le cylindre *ll'* qui enveloppe l'axe *xy*, et qui est destiné, au moyen de six rayons tels que *or* et *o'r'*, à porter le cercle divisé *zz'*, que l'on appelle *cercle azimuthal*.

Deux nonius, diamétralement opposés, dont l'en est représenté en *nn'* (*Fig.* 16) sont fixés sur le bord de la boîte pour tourner avec elle, et pour marquer de quel angle elle tourne soit en partant du zéro, soit en partant d'une division donnée du cercle azimuthal.

Les vis calantes vv' servent à rendre l'appareil horizontal au moyen du niveau NN'.

LL' (*Fig.* 16) est une lunette : elle est portée sur un axe

de rotation AA', parallèle au cercle des azimuths, et dont le milieu est dans la verticale du pivot. On remplit cette condition au moyen des petites vis qui terminent le montant M'. Dans son mouvement de rotation, la lunette emporte un nonius *ius* (*Fig.* 16) qui parcourt l'arc divisé DD', et qui donne immédiatement l'angle du rayon visuel avec l'horizon.

Pour observer la déclinaison au moyen de cet instrument, on le dispose horizontalement, on fait tourner la boîte pour amener dans le champ de la lunette un astre connu dont on observe la hauteur; en même temps on lit la division correspondante du cercle de l'aiguille et celle du cercle des azimuths, ce qui donne l'angle du méridien magnétique avec le vertical de l'astre au moment de l'observation. Il reste ensuite à trouver, par les méthodes astronomiques, l'angle vertical de l'astre avec le méridien du lieu pour en déduire la déclinaison. Si l'aiguille de la boussole n'est pas éprouvée d'avance, et si l'on ne connaît pas sur elle l'influence du retournement, il est nécessaire de faire une seconde observation après l'avoir retournée, comme nous l'avons dit précédemment (300).

Pour donner une idée des changemens qu'éprouvent la déclinaison, nous rassemblerons, dans le tableau suivant, les observations qui ont été faites à Paris à différentes époques.

Tableau des déclinaisons observées à Paris.

Année 1580	11°	30′	est.
1618	8		*id.*
1663	0		
1678	1	30	ouest.
1700	8	10	*id.*
1767	19	16	*id.*
1780	19	55	*id.*
1785	22	00	*id.*
1805	22	5	*id.*
1813	22	28	*id.*
1814	22	34	*id.*
1816, 12 oct., 3 heures après midi,	22	25	*id.*
1817, 10 fév., 1 heure après midi,	22	19	*id.*
1818, 15 oct., 2 heures après midi,	22	22	*id.*
1819, 22 avril, 2 heures après midi,	22	29	*id.*
1820	»	»	»
1821	»	»	»
1822, 9 oct., midi.	22	11	*id.*
1823, 21 nov.	22	23	*id.*
1824, 13 juin, 1 heure après midi,	22	23	*id.*
1825, 18 août, midi.	22	22	*id.*
1826	»	»	»
1827	22	20	
1828	22	6	
1829	22	12	

On voit, 1°. que, depuis 1580, la déclinaison a varié de plus de 30°;

2°. Que c'est en 1663 qu'elle a été nulle;

3°. Que sa marche a été sensiblement progressive vers l'ouest depuis les premières observations jusqu'en 1820;

4°. Que, depuis cette époque, elle semble éprouver un mouvement rétrograde vers l'orient.

Il importe de consigner exactement les époques des observations, car l'heure du jour a même une influence sur les résultats.

La *boussole marine* ou *compas de variation* n'est autre chose qu'une boussole de déclinaison; seulement elle est suspendue de manière à se maintenir, au milieu de l'agitation de la mer, dans une situation sensiblement horizontale. Les figures 18 et 22 représentent une vue et une coupe de cet instrument.

bb' bords de la boîte dont le fond est en *ff'*.

v, verre qui la ferme.

p, pivot qui peut être élevé ou abaissé au moyen de la vis *w*.

gg', aiguille dont la chape est en *c*.

n', feuille mince de papier doublée d'une feuille de talc ou de quelque autre substance légère et rigide. Ces feuilles forment ce qu'on appelle la *rose des vents*; elles sont attachées ou collées à l'aiguille pour se mouvoir avec elle. La rose est un cercle dont le centre est dans la verticale du pivot, et dont la circonférence porte à la fois des divisions en degrés, et les signes des vents.

pp', deux pinnules, la première ayant une fente étroite, et la seconde, une large fente au milieu de laquelle on suspend un petit fil à plomb.

M, miroir à faces bien parallèles, incliné de 55°, ayant à peu près la largeur de la pinnule oculaire *p*. La petite bande du miroir qui correspond à la fente de cette pinnule est désétamée dans sa partie supérieure seulement, pour que l'observateur puisse, au travers de la glace, viser au fil de la pinnule *p'*.

o, position de l'œil au moment de l'observation. Au moyen des deux pinnules, on vise à un astre, ou à un objet situé dans l'horizon, ou élevé de 15 ou 20°. En même temps on voit, par réflexion sur le miroir, en *i* une portion de la *ligne de foi f* qui est peinte en noir sur le bord intérieur de

la boîte, et en *i'* la division de la rose qui se trouve vis-à-vis la ligne de foi, c'est-à-dire dans le plan vertical du pivot et des fentes des pinnules.

De cette manière on connaît d'un seul coup d'œil l'angle de l'aiguille ou du méridien magnétique, avec le plan vertical de l'astre ou de l'objet. Il reste à déterminer par les moyens connus l'angle de ce dernier plan, avec le méridien astronomique du lieu, pour en déduire la déclinaison. Tout l'instrument est porté sur une traverse TT' (*Fig.* 18) qui se visse, au moyen de la plaque P, sur un pied, où elle peut tourner librement. Un cercle fixe cc' est porté sur cette traverse; un cercle intérieur *cc'* repose sur le premier, et tourne sur l'axe *xx'*; enfin la boîte elle-même est portée par ce cercle mobile, et tourne sur lui, au moyen de l'axe *zz'* qui est perpendiculaire à *xx'*. C'est par ces deux mouvemens rectangulaires que la boîte conserve son horizontalité; ils constituent ce qu'on appelle la *suspension de Cardan*.

La boussole a été en usage chez les Chinois long-temps avant d'être connue en Europe. On peut conclure de plusieurs documens authentiques, rapportés dans la Description de l'empire de la Chine de Duhalde, que plus de mille ans avant Jésus-Christ les Chinois se servaient de la boussole pour se diriger sur les continens. On a supposé que Marco Paolo nous avait apporté cette invention: mais ce voyageur célèbre, qui connut si bien la Chine, ne fut de retour en Europe qu'en 1295; et il est parlé de la boussole dès 1180, dans les vers de Guyot de Provins, et dès 1266 dans l'histoire de Norwége. On s'accorde en général à regarder les Melphitains comme les premiers inventeurs de la boussole européenne; et il paraît constant que son usage ne fut un peu répandu que vers l'an 1300.

On croyait, dans les premiers temps, que l'aiguille aimantée se tournait directement au nord dans tous les lieux de la terre; et l'on rapporte que Colomb fut très-étonné

d'observer une déclinaison en 1492, lorsqu'il parcourait l'Océan pour aller découvrir le Nouveau-Monde. Il paraît que Cabot, de Venise, qui devint grand-pilote d'Angleterre, fit des observations analogues vers l'an 1500.

Le fait de la déclinaison une fois connu, il fallait découvrir les variations qu'elle éprouve lorsqu'on passe d'un lieu à l'autre. Les premières tables un peu précises qui constatent ce phénomène important furent dressées en 1599 par les navigateurs hollandais, d'après les ordres du prince de Nassau.

Enfin, le changement de la déclinaison dans le même lieu fut découvert, en 1622, par Gunter, professeur au collége de Gresham : il trouva à Londres une déclinaison orientale de 6° 13′; tandis qu'elle avait été trouvée de 11° 15′ aussi à l'orient, en 1580, par Robert Norman, le même qui découvrit l'inclinaison en 1576.

302. *Boussole d'inclinaison.* — Elle est représentée dans les figures 24, 25, 26 et 27.

La figure 25 représente l'aiguille d'inclinaison gg' vue sur sa largeur, et la figure 26 la représente vue sur son épaisseur. Les sections s, s′, s″, donnent une idée de sa forme.

EE′ est une sorte de virole ou d'anneau en cuivre qui s'ajuste, à frottement très-dur, vers le milieu de la longueur de l'aiguille; il porte un axe en cuivre CC′, terminé par de petits cylindres d'acier poli a et a', qui forment l'axe de rotation. L'axe mathématique aa' de ces deux cylindres doit passer par le centre de gravité de l'aiguille : on essaie d'atteindre cette condition, ou du moins d'en approcher le plus possible, en plaçant l'anneau convenablement et en faisant mouvoir les vis latérales vv' (*Fig.* 25).

L'aiguille est en place dans la figure 24; le rectangle sur lequel elle repose est une pièce importante de la boussole. On le voit plus en grand et avec plus de détails dans la figure 27, qui ne contient que l'un de ses côtés. Il se com-

pose d'une traverse fixe TT′ qui porte le couteau d'agate *pp′*, et d'une autre traverse MM′, mobile autour de l'axe A. Celle-ci porte une fourchette *f* qui soulève l'axe de l'aiguille quand on ne veut plus qu'elle repose sur le couteau d'agate, et d'une pièce d'arrêt R qui empêche l'axe de glisser sur la fourchette. Cet ajustement est combiné pour que l'axe de l'aiguille se trouve exactement au centre du limbe d'inclinaison LL′ (*Fig.* 24), et perpendiculaire à son plan dès qu'on abaisse la fourchette pour commencer l'observation.

Le limbe LL′ repose perpendiculairement sur une plaque solide PP′, qui porte aussi les montans du rectangle, une cage en verre CC′ et un niveau NN′. Tout ce système est mobile autour d'un axe vertical XX′, qui passe par le centre du cercle LL′, et par conséquent par le centre de gravité de l'aiguille. Un nonius *nn′*, attaché à la plaque PP′, parcourt le cercle azimuthal ZZ′ pour marquer à chaque instant sur ce plan les angles décrits par le limbe vertical.

Pour observer l'inclinaison avec cet instrument, quand on connaît déjà la déclinaison ou la direction du méridien magnétique, on met le limbe vertical dans cette direction, et l'aiguille vient d'elle-même se placer suivant la ligne d'inclinaison; si l'on ne veut pas attendre qu'elle soit en repos, on prend le milieu des petites oscillations qu'elle fait avant de s'arrêter. Après ce premier résultat, on retourne les faces de l'aiguille sans en retourner les pôles, afin de corriger par ce retournement les erreurs qui pourraient provenir soit de l'irrégularité de l'aimantation, soit de l'excentricité du centre de gravité; mais ces deux causes d'erreur n'étant par là qu'imparfaitement compensées, il est nécessaire de faire deux autres observations pareilles, après avoir renversé les pôles de l'aiguille en l'aimantant en sens contraire. C'est la moyenne de ces quatre résultats qui donne l'inclinaison.

On peut facilement se dispenser de déterminer d'avance la déclinaison. En effet, le couple terrestre étant contenu

dans le plan du méridien magnétique, l'aiguille n'est jamais sollicitée à sortir de ce plan, et par conséquent elle doit se diriger verticalement quand on l'oblige à se mouvoir dans un plan vertical perpendiculaire à ce méridien. Réciproquement, si l'on tourne le limbe de la boussole jusqu'à ce que l'aiguille soit verticale, on peut être assuré qu'il est alors perpendiculaire à l'aiguille de déclinaison, et il suffit de lui faire décrire, à partir de là, 90° sur le cercle azimuthal pour l'amener dans le méridien magnétique. On pourrait encore, pour plus de simplicité, chercher par quelques tâtonnemens l'azimuth du limbe qui donne le minimum d'inclinaison; ce minimum est l'inclinaison du lieu, puisque de part et d'autre l'aiguille se rapproche de la verticale (1).

Coulomb avait proposé de déterminer l'inclinaison (*Mém. de l'Inst.*, t. IV, pag. 565) par un autre moyen que l'on a recommandé depuis comme très-exact, mais qui me semble cependant soumis à trois causes d'erreur. Il part de ce principe, que la somme des momens des

---

(1) Il suffit d'une construction géométrique très-simple pour expliquer ce qui arrive à l'aiguille d'inclinaison pendant que le limbe de la boussole décrit une circonférence entière sur le cercle des azimuths.

Soit V M (*Fig.* 42) la direction du méridien magnétique.

C le centre de l'aiguille, A son pôle incliné, et CA la direction qu'elle prend, en sorte que son prolongement A F marque la direction de la force magnétique de la terre; A C H est l'angle d'inclinaison, et A C V est l'angle de l'aiguille avec la verticale C V.

Si sur A V, comme diamètre, nous décrivons une circonférence, elle sera le lieu de toutes les positions que doit prendre le pôle A pendant que le limbe fait une révolution entière autour de C V. En effet, quand le limbe est en V P′, par exemple, il faut que le pôle soit en A′ et l'aiguille dirigée suivant C A′; car A A′ étant perpendiculaire sur V P′, le plan C A A′ est perpendiculaire sur le plan C V P′; la force de la terre qui agit en A′ étant parallèle à A F, se trouve comprise dans le premier de ces plans, et par conséquent elle peut être décomposée en deux autres, l'une suivant A′ A, qui sera détruite comme perpendiculaire au plan C V P′ que peut décrire l'aiguille; l'autre suivant le prolongement de C A′, qui sera pareillement détruite,

forces qui tendent à ramener une aiguille horizontale dans le plan du méridien magnétique est donné par la formule

$$\frac{P\,l^2}{3\lambda}.$$

P est le poids de l'aiguille;

l est la moitié de sa longueur;

λ est la longueur du pendule simple qui ferait ses oscillations dans le même temps que l'aiguille.

Ce principe est rigoureux, mais, premièrement, il suppose à l'aiguille une régularité de forme et une petitesse dans ses dimensions transversales que l'on ne peut jamais lui donner; et, secondement, il suppose qu'elle oscille autour de l'axe vertical passant par son centre de gravité, ce qui est loin d'être vrai dès que l'inclinaison est un peu grande. Cependant, si on l'admet, il est facile de trouver la valeur numérique de cette somme de mo-

---

comme dirigée vers le point fixe. La position CA′ est donc la position d'équilibre de l'aiguille. Ainsi, pendant la rotation du limbe, elle décrit un cône oblique dont le centre est en CA, et dont la base est AA′VA″.

Il résulte de là un autre moyen de trouver l'inclinaison sans connaître la déclinaison; car les lignes VA, VA′ et VA″ et les autres lignes pareilles peuvent être considérées comme les tangentes des angles que fait l'aiguille avec la verticale dans les divers azimuths VAM, VP′, VP″, etc. Or, pour deux azimuths tels que VP′ et VP″, faisant entre eux un angle droit, on a

$$VA'^2 + VA''^2 = A'A''^2 = VA^2.$$

Les angles VCA′ et VCA″ étant connus par l'observation, il suffit donc de prendre la somme des carrés de leurs tangentes pour avoir le carré de la tangente VA, qui est la tangente du complément ACV de l'inclinaison. En faisant ainsi plusieurs couples d'observations rectrangulaires, et en prenant la moyenne des résultats, on arrive à une valeur de l'inclinaison qui se trouve corrigée autant que possible de toutes les erreurs de l'équilibre et de toutes les irrégularités de l'aimantation.

mens. Pour l'aiguille de Coulomb l'on avait $p = 88^{gr},808$, $l = 213^{mm},3$; et comme elle faisait 50 oscillations en $495''$, il est facile de voir (53) que $\lambda = 994 \left(\frac{495}{50}\right)^2$; d'où il résulte

$$\frac{p\,l^2}{3\,\lambda} = 13^{gr},824.$$

Ce moment correspond à l'unité de distance, c'est-à-dire à 1 millimètre.

Pour trouver ensuite le moment vertical, on suspend l'aiguille, comme le fléau d'une balance, sur un axe passant à peu près par le centre de gravité; on cherche le contre-poids qu'il faut mettre sur le pôle boréal, pour la ramener à l'horizontalité. Ce contre-poids était dans l'expérience de Coulomb, de $0^{gr},2$ placés à $170^{mm},5$ de l'axe de suspension. Ce résultat suffirait si cet axe pouvait en effet passer exactement par le centre de gravité; mais pour se mettre à l'abri de cette circonstance on aimante l'aiguille en sens contraire, et c'est ici où se trouve la troisième cause d'erreur : car il faut l'aimanter pour qu'elle fasse encore, comme la première fois, cinquante oscillations en $495''$; ce qui est excessivement difficile. Cependant, ce point une fois atteint, on la remet en équilibre sur son axe, qui doit n'être pas déplacé, et on cherche de nouveau le contre-poids qui la rend horizontal; il était de $0^{gr},2093$ placé à $194^{mm},5$.

La moyenne de ces deux contre-poids donne $37^{gr},348$ pour l'unité de distance, ou 1 millimètre; ainsi, la composante horizontale de l'action de la terre étant représenté par 13,824, sa composante verticale est représentée par 37,348. La résultante de ces deux forces, ou l'action de la terre elle-même, fait donc avec l'horizon un angle dont la tangente est $\frac{37,348}{13,824}$. C'est l'inclinaison; elle se trouve de 69° 41′.

On peut la supposer exacte, parce qu'elle a été déter-

minée par Coulomb, qui a sans doute atténué, autant qu'il était possible, toutes les causes d'erreur, et compensé par son adresse ce qui restait de défectueux dans le procédé.

Le tableau suivant contient diverses inclinaisons observées à Paris. Celles qui précèdent 1798 peuvent offrir des erreurs assez considérables, parce qu'alors on ne prenait pas la moyenne de quatre observations, comme nous l'avons indiqué.

Tableau de l'inclinaison pour Paris.

Année	1671	75°
	1754	72 1'5'
	1776	72 25
	1780	71 48
	1791	70 52
	1798	69 51
	1806	69 12
	1810	68 50
	1814	68 36
	1816	68 40
	1817	68 38
	1818	68 35
	1819	68 25
	1820	68 20
	1821	68 14
	1822	68 11
	1823	68 8
	1824	68 7
	1825	68 0
	1826	68 0
	1827	»
	1828	»
	1829	67° 41'.

Sauf quelques irrégularités qui sont peut-être des erreurs d'observation, il résulte de ce tableau que l'inclinaison, à Paris, a été toujours en diminuant depuis 1671, et que la quantité de sa diminution a été sensiblement variable d'une année à l'autre.

La découverte de l'inclinaison remonte à l'année 1576; elle est due à Robert Norman, ingénieur en instrumens dans l'un des faubourgs de Londres: jusque là on avait supposé que l'aiguille devait être horizontale, et lorsqu'en Europe on voyait son pôle austral s'abaisser, on se contentait d'admettre que le centre de gravité était mal déterminé. Robert Norman, observateur plus ingénieux et plus précis qu'on ne l'était alors, mesura le contre-poids qu'il fallait ajouter, et fut conduit ainsi à l'une des plus importantes découvertes du magnétisme.

303. *Aiguille astatique.* — On appelle ainsi une aiguille aimantée qui est soustraite à l'action de la terre et qui n'a plus de position statique où elle se trouve en équilibre sous l'influence de cette force. La construction de l'aiguille astatique repose sur ce principe, qu'un corps mobile, autour d'un axe, ne peut recevoir aucun mouvement d'une force qui agit parallèlement à cet axe.

L'aiguille aimantée *g g* (*Fig.* 19) étant donc mobile autour de l'axe *a a'*, il suffit d'amener cet axe dans la direction de la force magnétique de la terre pour qu'elle soit indifférente dans toutes ses positions. Deux mouvemens rectangulaires conduisent à ce but: l'un est produit au moyen de la vis sans fin v, et du rouet G, dans lequel elle engrène; l'autre au moyen de la vis v' et du rouet G'. Le cercle divisé c c' sert à marquer les positions de l'aiguille.

On peut encore rendre une aiguille astatique en neutralisant l'action magnétique de la terre par une autre action magnétique, égale et contraire. Il suffit pour cela de posséder un barreau d'une assez grande force, pour qu'à une

distance très-grande par rapport aux dimensions de l'aiguille, il agisse sur elle aussi énergiquement que le fait la terre: alors on le place dans le plan du méridien magnétique, en le disposant parallèlement à la direction que prendrait l'aiguille dans son équilibre et en tournant vers elle son pôle répulsif, c'est-à-dire son pôle austral, s'il est du côté du nord, et son pôle boréal s'il est du côté du midi. A une distance trop petite, le barreau est plus puissant que la terre, il fait pirouetter l'aiguille et la maintient dans cette position renversée; à une distance trop grande la terre est plus puissante que lui, et l'aiguille conserve sa direction naturelle; enfin à une certaine distance intermédiaire, la compensation a lieu, et l'aiguille reste indifférente dans toutes ses positions. Mais l'on conçoit que la force terrestre qui forme un couple ne peut être exactement compensée que par un couple égal et opposé, et le barreau ne peut donner naissance à un couple qu'en agissant avec la même énergie sur les deux pôles de l'aiguille; voilà pourquoi il doit être placé à une distance très-grande par rapport à la distance de ses pôles.

Il y a enfin un autre moyen plus simple et plus direct de se donner un système astatique: il consiste à réunir sur un même axe deux aiguilles tournées en sens contraire l'une de l'autre. La *figure* 44 représente un système astatique dont l'axe commun est l'axe de rotation; alors les deux aiguilles doivent être parfaitement identiques pour la forme et pour la distribution du magnétisme. Quand elles sont disposées bout à bout, et que l'axe de rotation est perpendiculaire à leur longueur, il est facile de voir qu'on peut obtenir une compensation très-approchée avec des aiguilles sensiblement différentes.

Pour arriver par ce procédé à une compensation plus parfaite, et pour varier à volonté la force directrice que l'on doit, dans une foule d'expériences, conserver au système, j'ai coutume de disposer l'appareil comme on le

voit dans la *figure* 45. L'une des aiguilles est horizontale et l'autre inclinée; la force directrice de celle-ci diminuant à mesure que l'on augmente son inclinaison, il est facile de la rendre parfaitement égale et opposée à celle de la première, ou un peu moindre ou un peu plus grande.

304. *Variations diurnes.* —L'aiguille de déclinaison éprouve tous les jours quelques mouvemens à l'est ou à l'ouest du méridien magnétique: tantôt ces mouvemens sont brusques et accidentels, tantôt ils sont réguliers et périodiques; dans le premier cas on le nomme *perturbations;* dans le second cas ils se composent ce qu'on appelle les *variations diurnes.* Dans les jours qui ne sont pas marqués par quelques perturbations, l'on observe à Paris les phénomènes suivans: pendant la nuit l'aiguille est à peu près stationnaire; au lever du soleil elle se met en mouvement, et son pôle austral (ou son extrémité nord) marche à l'ouest comme s'il fuyait l'influence de cet astre; vers midi, ou plus généralement de midi à trois heures, il atteint son *maximum* de déviation occidentale; ensuite, par un mouvement contraire, il revient à l'orient jusqu'à 9, 10 ou 11 heures du soir: alors, soit qu'il ait repris exactement sa position primitive, soit qu'il s'en trouve seulement très-rapproché, il s'arrête et reste immobile pendant toute a durée de la nuit, pour recommencer le lendemain une oscillation pareille. L'*amplitude* de la variation diurne est l'angle que parcourt l'aiguille depuis la station du matin jusqu'au maximum de déviation occidentale. Cet angle est tous les jours variable; cependant il résulte des nombreuses observations de M. de Cassini, qu'en général il est plus grand pendant l'été, depuis l'équinoxe du printemps à l'équinoxe d'automne, et plus petit pendant l'hiver, depuis l'équinoxe d'automne à l'équinoxe du printemps. Sa valeur moyenne pour les mois d'avril, mai, juin, juillet, août et septembre, paraît être de 13′ à 15′, et seulement de 8′ à 10′ pour les mois d'octobre, novembre, décembre, janvier,

février et mars. Il y a des jours où il s'élève jusqu'à 25′, et d'autres où il ne dépasse pas 5 ou 6′.

On doit encore à M. de Cassini cette remarque importante, que dans les caves de l'Observatoire l'aiguille de déclinaison éprouve aussi des changemens journaliers; là, à plus de 80 pieds sous terre, à l'abri de toutes les influences de la lumière et de la chaleur du jour, l'amplitude de ses variations est la même qu'à la surface du sol, et c'est aux mêmes heures qu'elle est immobile, qu'elle marche à l'occident et qu'elle revient à l'orient.

Dans les régions plus septentrionales, comme en Danemarck, en Islande et au nord de l'Amérique, les variations diurnes sont en gérnéral plus considérables et moins régulières; il paraît aussi que l'aiguille ne conserve pas pendant la nuit l'immobilité qu'on observe à Paris, et que c'est vers le soir seulement qu'elle atteint son maximum de déviation occidentale.

Au contraire, en partant du nord pour aller vers l'équateur magnétique, les variations diurnes vont sans cesse en diminuant d'amplitude, et sur l'équateur magnétique lui-même elles sont sensiblement nulles. Il paraît cependant, d'après quelques observations du capitaine Duperrey, que la position du soleil, au nord ou au midi de l'équateur terrestre, pourrait avoir quelque influence pour faire osciller, de part et d'autre de l'équateur magnétique, les points qui sont sans variations.

Au midi de l'équateur magnétique, les variations diurnes se produisent dans un ordre inverse : l'extrémité nord de l'aiguille marche vers l'est, aux mêmes heures où dans l'hémisphère boréal elle marche à l'ouest; ce résultat curieux est constaté par les observations qui ont été faites, en 1794, 1795 et 1796, au fort Marlbrough de Sumatra et à Sainte-Hélène, par M. J. Macdonald; en 1818, 1819 et 1820, à l'île de France, à Timor, à Rawak, à Guham, à Mowi et au port Jackson, par le capitaine Freycinet; et

en 1822, 1823 et 1824, dans plusieurs points qui avoisinent l'équateur magnétique, par le capitaine Duperrey.

On ne sait pas encore d'une manière précise si, dans chaque hémisphère, les variations diurnes se font dans le même sens aux lieux où la déclinaison est occidentale, et aux lieux où elle est orientale. Il y a sur ce point quelque discordance entre les observations trop peu nombreuses que nous possédons, et c'est un phénomène sur lequel il importe d'appeler l'attention des physiciens.

Il est probable que l'aiguille d'inclinaison est soumise à des variations diurnes, comme celle de déclinaison; mais elle a moins d'amplitude dans ses mouvemens, et il n'a pas été possible, jusqu'à ce jour, de les observer avec précision.

En généralisant ces résultats, on peut présumer qu'une aiguille aimantée, mobile dans un plan quelconque, éprouverait des oscillations journalières, et qu'une aiguille qui serait mobile dans tous les sens autour de son centre de gravité, décrirait chaque jour un cône dont la base serait une ellipse ou une autre courbe, plus ou moins allongée dans les différens lieux de la terre.

Les variations diurnes furent observées pour la première fois par Graham, à la fin de 1722; ensuite elles furent étudiées avec soin, en Suède, par Hiorter et Celsius vers 1740, et par Wargentin en 1750; à Londres, par Canton, en 1756; en Danemark, par Lous, de 1765 à 1772; à Rome, par le père Ascleppi, en 1772; en France, par M. de Cassini, de 1780 à 1790. Depuis cette époque, les instrumens sont devenus plus parfaits, les observations se continuent sur plusieurs points du globe, et les voyageurs, dans leurs courses autour du monde, doivent les compter comme un des objets les plus importans de leurs recherches.

La *figure* 23 représente *la boussole de variation*. Tous les observateurs ne peuvent pas sans doute se procurer un instrument aussi complet; mais tous peuvent disposer des

aiguilles d'après les principes de sa construction, et arriver ainsi à une assez grande exactitude dans les observations. Il est presque inutile de faire remarquer que toutes les pièces de métal sont en cuivre rouge très-pur.

MM'. Table de marbre blanc, sur laquelle reposent les colonnes et la boîte de l'instrument.

LL'. Colonnes pour la suspension.

L_1L_1'. Colonnes pour le premier microscope.

L_2L_2'. Colonnes pour le second microscope.

BB'. Boîte de la boussole.

AA'. Aiguille aimantée, passée de champ dans un petit anneau de cuivre *aa'*; à cet anneau est attaché un fil, ou plutôt un assemblage de fils de soie sans torsion, qui porte l'aiguille et qui vient s'enrouler sur le petit treuil *t*. Ce fil est maintenu au centre du cercle divisé *cc*, en traversant, là, une petite ouverture triangulaire. Il est enfermé dans une petite cage de verre, qui s'élève entre les deux colonnes LL', pour que l'air ne puisse ni l'agiter ni pénétrer dans la boîte; en tournant le treuil *t* dans un sens ou dans l'autre on peut élever ou abaisser l'aiguille. Deux lames de verre, mobiles à volonté, ferment les ouvertures de la boîte, qui correspondent aux deux extrémités de l'aiguille; sur chacune de ces extrémités est solidement fixée une petite plaque d'ivoire, portant des divisons très-fines, dont la valeur angulaire dépend de la distance au centre de suspension; c'est en général 15 ou 20'.

Après avoir disposé l'appareil à peu près dans le plan du méridien magnétique, et l'avoir nivelé soigneusement, on s'assure que le fil de soie est sans torsion, et par quelques tâtonnemens on arrive à diriger les microscopes T et T' sur la ligne de foi de l'aiguille, dont on voit la trace sur les deux plaques d'ivoire. Alors il est facile d'observer les déplacemens qu'elle éprouve, soit en comptant les divisions qui ont passé sous le fil, soit en suivant ses mouvemens, au moyen des vis de rappel qui font marcher les microscopes.

De petites loupes, p et p', mobiles sur les tiges t et t', servent à lire la position ou la course de chaque microscope sur la traverse qui le porte, et qui règle son mouvement latéral.

La lunette T'' est destinée à compter plus commodément, et par conséquent plus sûrement les oscillations de l'aiguille, lorsqu'on veut l'employer à la détermination des intensités magnétiques. Elle porte au devant de l'objectif un miroir qui ramène les rayons verticaux dans la direction de son axe.

305. *Perturbations de l'aiguille aimantée.* — Plusieurs causes naturelles agissent sur l'aiguille aimantée, pour la déranger brusquement de sa position, ou pour troubler au moins la régularité de ses variations diurnes. Entre toutes ces causes, l'aurore boréale paraît la plus efficace et la plus infaillible : quand ce météore se lève pour les régions du nord, le ciel est resplendissant de lumière; et pendant toute sa durée, qui est quelquefois de dix à douze heures, l'aiguille aimantée éprouve une agitation continuelle et une déviation considérable. Le *sommet* de l'arc étincelant de l'aurore boréale est en général dans le méridien magnétique, et sa *couronne*, c'est-à-dire le foyer vers lequel s'élancent les gerbes de feu qui semblent partir de l'horizon ou de l'arc lui-même, se trouve toujours à peu près dans le prolongement de l'aiguille d'inclinaison. Ce n'est pas seulement dans les lieux où l'aurore boréale est visible que la boussole est agitée; elle l'est aussi à de grandes distances, à Paris, par exemple, lors même qu'on n'aperçoit dans le ciel aucune trace de lumière. Mais, en général, l'agitation est d'autant plus grande que le phénomène est plus voisin et se montre avec plus d'intensité; ainsi, la boussole de l'Observatoire éprouve souvent, dans le jour ou dans la nuit, une déviation subite qui s'élève parfois à plus de 1°, sans qu'on en puisse découvrir la cause apparente; et l'on apprend ensuite qu'aux mêmes instans les boussoles de Londres et de Pétersbourg

ont éprouvé des mouvemens analogues, et que dans les contrées du nord on a observé quelque brillante aurore boréale. Un observateur, dans son cabinet, est donc averti par la boussole de ce qui se passe dans les régions polaires, comme il est averti par le baromètre de ce qui se passe dans les plus hautes régions de l'atmosphère.

Les tremblemens de terre et les éruptions des volcans paraissent agir aussi sur l'aiguille aimantée, et quelquefois ces phénomènes la dérangent d'une manière permanente. D. Bernouilli a vu, en 1767, l'inclinaison diminuer d'un demi-degré par un tremblement de terre, et le père de La Torre a remarqué des changemens de plusieurs degrés dans la déclinaison pendant une éruption du Vésuve.

Enfin l'on a supposé que les ouragans, la neige et les orages ont aussi quelque influence sur l'aiguille aimantée; mais il faut probablement rapporter aux aurores boréales les changemens sur lesquels on a fondé cette opinion. Cependant, quand le tonnerre frappe des corps aimantés, ou quand il tombe seulement à quelque distance du lieu où ils sont, il change, détruit, ou renverse leur magnétisme; on en a vu de trop malheureux exemples à bord des vaisseaux : plusieurs fois les boussoles de service ont eu leurs pôles renversés par la foudre, et les navigateurs prenant alors le nord pour le sud, couraient avec confiance se jeter dans les écueils. La découverte de l'électro-magnétisme nous expliquera ces phénomènes.

306. *Intensité magnétique de la terre.* — Un des points les plus importans de la théorie du magnétisme terrestre est la détermination de son intensité pour les différens points de la surface du globe, ou pour le même point, à des époques différentes. C'est dans ces derniers temps seulement qu'on a eu l'heureuse idée d'appliquer à cette recherche des moyens susceptibles de quelque précision. Graham paraît être le premier qui se soit occupé de cette question, vers la fin de 1722; Muschenbroek fit quelques

efforts pour la résoudre en 1729; Lemonnier, en 1776, se contenta d'en montrer l'importance; de Saussure voulut comparer la force magnétique de la terre, à Genève et au sommet du Mont-Blanc; enfin Borda, reprenant la question dans toute sa généralité, indiqua les moyens de la résoudre avec une grande approximation; et bientôt après, sa méthode fut employée par M. de Humboldt, dans son voyage d'Amérique, et dans un autre voyage en France, en Prusse et en Italie.

Cette méthode est fondée sur les oscillations nombreuses que fait une aiguille librement suspendue, lorsqu'on l'écarte un peu de sa position, et qu'ensuite on l'abandonne à elle-même. Si elle est régulièrement aimantée, et que l'axe de suspension passe par son centre de gravité, elle oscille par l'effort du couple magnétique de la terre, comme oscillerait séparément chacune de ses moitiés, sollicitée par l'une des forces du couple. Ainsi, elle forme un véritable pendule composé, qui reste parfaitement identique, quand la distribution du magnétisme reste exactement la même dans tous les points de sa substance; car si le fluide libre éprouvait quelque changement, soit dans sa quantité, soit dans son arrangement, la résultante aurait une autre intensité ou un autre point d'application, et la même aiguille formerait en réalité un pendule différent. Supposant donc que l'aiguille reste matériellement et magnétiquement la même, une différence dans la durée de ses oscillations ne pourra dépendre que d'une différence dans l'intensité des forces qui la sollicitent, et la pesanteur restant la même, elle ne pourra dépendre que d'une différence dans l'intensité de la force magnétique. Or, sous ces conditions, les intensités de la force et les durées des oscillations sont liées par le principe suivant: que les forces sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations exécutées dans le même temps. Ainsi, M étant la force magnétique qui agit sur l'aiguille quand elle fait N oscillations

dans un certain temps, dans 100″ par exemple, et M′ étant la force qui la sollicite quand elle fait N′ oscillations dans le même temps de 100″, l'on a

$$\frac{M}{M'} = \frac{N^2}{N'^2}.$$

Si, par exemple, on avait trouvé $N = 25$ et $N' = 24$, on aurait

$$\frac{M}{M'} = \frac{625}{576} = 1{,}085,$$

c'est-à-dire que la première force serait à la seconde comme 1,085 est à 1, ou comme 1085 est est à 1000.

Pour appliquer cette méthode on peut faire osciller une aiguille, soit dans le plan du méridien magnétique, autour de la ligne d'inclinaison, soit perpendiculairement au méridien magnétique autour de la ligne de déclinaison; on pourrait même la faire osciller dans d'autres positions, mais l'on n'y trouverait nul avantage.

Oscillations de l'aiguille d'inclinaison. — Puisque le plan du méridien magnétique varie à chaque instant, il faut apporter un grand soin à placer la boussole dans sa vraie direction du moment; et puisqu'on doit compter un grand nombre d'oscillations de l'aiguille, il faut aussi apporter un grand soin à donner à l'axe toute la mobilité qu'il peut prendre sur ses deux couteaux d'agate. Ces conditions remplies, on écarte l'aiguille de 3 ou 4° de sa position d'équilibre, on l'abandonne à elle-même, et avec un chronomètre, ou une bonne montre à secondes, on compte très-soigneusement le nombre des oscillations qu'elle exécute dans un temps donné. Après quelques séries d'observations successives, dont on prend la moyenne, on enlève l'aiguille, on la conserve dans un étui avec beaucoup de précautions, pour qu'elle ne reçoive aucun choc ou aucune influence magnétique étrangère, et ensuite on peut l'emporter dans des voyages, pour répéter des expériences pareilles en dif-

férens points du globe. Mais pour que les résultats puissent inspirer de la confiance, il est nécessaire d'avoir plusieurs aiguilles de cette espèce qui se vérifient l'une l'autre, et même il est convenable de revenir au même lieu, les faire osciller encore une fois, pour s'assurer qu'elles ont bien conservé leur magnétisme. Dans la recherche de l'inclinaison, la méthode du retournement (300) peut corriger les erreurs qui proviendraient d'une aimantation irrégulière, ou d'un déplacement du centre de gravité; mais pour les recherches d'intensité, l'aiguille devant rester absolument identique, il faut se garder de l'aimanter en sens contraire, et par conséquent il faut, par tous les moyens de vérification, s'assurer que son magnétisme est régulier, et son centre de gravité bien placé.

Oscillations de l'aiguille de déclinaison. — La force qui fait osciller l'aiguille de déclinaison n'est qu'une partie de la force magnétique de la terre, et une partie d'autant plus petite que l'inclinaison est plus grande; tellement, qu'aux pôles magnétiques où l'inclinaison est de 90°, l'aiguille de déclinaison n'a plus de force, ni pour se diriger ni pour osciller. En général, i étant l'angle d'inclinaison d'un lieu (*Fig.* 28), la force terrestre, dont l'intensité est M, se décompose en deux autres par la règle du parallélogramme des forces (18) : l'une, verticale, ayant pour valeur $M \sin. i$, et qui est détruite par la suspension; et l'autre, horizontale, ayant pour valeur $M \cos i$, qui est seule efficace pour diriger et pour faire osciller l'aiguille de déclinaison. Pour un autre lieu, où l'intensité serait M' et l'inclinaison i', la force horizontale serait $M' \cos i'$ et les deux forces seraient entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations N et N', qu'elles font exécuter à la même aiguille dans le même temps. On aurait donc

$$\frac{M \cos i}{M' \cos i'} = \frac{N^2}{N'^2} \text{ ou } \frac{M}{M'} = \frac{N^2 \cos i'}{N'^2 \cos i},$$

c'est à-dire qu'ayant observé dans des lieux différens les nombres d'oscillations N et N' que fait la même aiguille, dans le même temps, il faut, pour avoir le rapport des forces magnétiques, multiplier le rapport carré des nombres d'oscillations par le rapport renversé des cosinus d'inclinaison.

Cette méthode d'observation semble avoir quelque avantage sur la précédente, 1° parce qu'il faut un artiste très-habile pour faire une aiguille d'inclinaison tolérablement bonne et bien équilibrée, tandis qu'une aiguille de déclinaison s'équilibre d'elle-même dans la chape de papier où elle est suspendue; 2° parce que les couteaux d'agate et l'axe de l'aiguille d'inclinaison offrent beaucoup plus de frottement que le fil de soie sans torsion qui suspend l'aiguille de déclinaison. Cependant il y a dans les oscillations horizontales une source d'erreur inévitable : l'un des pôles de l'aiguille ayant une tendance à plonger au dessous de l'horizon, il en résulte que le prolongement du fil de suspension ne passe jamais par le centre de gravité; de là une différence dans les deux bras de levier de l'aiguille horizontale, et une différence qui change avec l'inclinaison. Il est d'autant plus nécessaire de signaler cette cause d'erreur qu'elle a échappé aux plus habiles observateurs, bien qu'elle soit assez influente pour rendre tout-à-fait incomparables les observations faites en des lieux où l'inclinaison est très-différente.

Comme l'acier le mieux préparé ne conserve pas son magnétisme indéfiniment sans altération, il est impossible d'avoir des comparaisons d'intensité fort exactes pour des époques un peu éloignées.

En discutant les observations d'intensité qui ont été faites en différens points de la terre, soit en Europe, soit en Amérique, soit dans les îles de l'Océan, de la mer des Indes ou de la mer Pacifique, on arrive à ce résultat général que l'intensité est la plus petite vers l'équateur magnétique, et qu'elle va en augmentant à mesure qu'on s'en éloigne vers le nord ou vers le sud. Il paraît que vers les pôles elle serait

environ une fois et demie aussi grande qu'à l'équateur. Dans le même lieu elle paraît changer aussi avec les variations diurnes, mais les différences très-petites qu'elle éprouve demandent à être constatées par de nouvelles observations.

307. *De l'action de la terre sur le fer doux.* — La terre exerce une action continuelle sur toutes les substances qui contiennent du magnétisme; elle agit comme un vaste aimant qui fait sans cesse effort pour attirer ou repousser les fluides décomposés, et pour décomposer les fluides naturels. Les différens corps magnétiques répandus sur la surface du globe résistent plus ou moins à cette puissance universelle, suivant l'intensité de leur force coercitive, mais tous en éprouvent quelque modification. Le fer doux est sous ce point de vue le corps le plus curieux à étudier, puisqu'il n'offre aucune résistance à la séparation de ses fluides, et qu'il ne conserve rien des actions magnétiques qu'il a subies. Les expériences suivantes nous donneront une idée des phénomènes qu'il présente.

Une barre de fer doux de deux ou trois pieds de longueur est mise en présence d'une petite aiguille d'épreuve (*Fig.* 29.)

Quand la barre est tenue verticalement, ou à peu près dans la direction de l'inclinaison; elle prend un pôle austral à son extrémité inférieure E; et un pôle boréal à son extrémité supérieure E′. C'est ce qu'il est facile de voir par les actions attractives et répulsives qu'elle exerce sur l'un ou sur l'autre pôle de l'aiguille, lorsqu'on la fait glisser de haut en bas ou de bas en haut, pour amener successivement en présence toutes les parties de sa longueur.

Pour s'assurer que le fer est sans force coercitive, et que c'est bien l'action terrestre qui décompose son magnétisme, il suffit de retourner rapidement la barre, l'extrémité E en haut, et l'extrémité E′ en bas; alors le pôle austral reste en bas, et le pôle boréal en haut: le second est cette fois en E et le premier en E′. Ainsi les fluides ont été instanta-

nément recomposés par leur action mutuelle et instantanément décomposés en sens inverse par l'action terrestre.

Ce qui se manifeste d'une manière si frappante sur une barre d'une certaine longueur, se manifeste avec moins d'intensité sur une pièce plus courte dans le sens de l'inclinaison. C'est pourquoi l'effet semble à peu près nul lorsqu'on tient la barre horizontalement, et surtout dans une position perpendiculaire au méridien magnétique.

Sous l'influence de l'aimant terrestre, tous les corps magnétiques deviennent donc de véritables aimans, mais des aimans à pôles mobiles et changeans ; de telle sorte qu'il suffit de les retourner de haut en bas pour que leurs pôles se renversent, et de varier un peu leur position pour que leurs pôles éprouvent quelques déplacemens dans l'intérieur de leur substance. Ce résultat nous indique combien il y a de précautions à prendre lorsqu'on veut faire avec les bousssoles des observations exactes ; car le fer qui entre dans la construction des édifices agit de deux manières sur les aiguilles aimantées ; il agit par la décomposition magnétique qu'il éprouve de la part de l'aiguille elle-même, et il agit surtout par les fluides libres, que la terre y maintient dans un état permanent de séparation. Avec quelques soins l'on peut aisément reconnaître les perturbations locales qui résulteraient de cette cause, car dans un espace un peu considérable, dans une lieue carrée, par exemple, l'action terrestre ne produit en général que quelques minutes de différence, soit dans l'inclinaison soit dans la déclinaison.

308. *Des causes mécaniques et chimiques qui ont une influence sur la force coercitive.* — Lorsqu'une barre de fer doux est soumise à l'action magnétique de la terre, il suffit de la frapper de quelques coups de marteau à l'une ou l'autre de ses extrémités, pour fixer au moins en partie les fluides décomposés, par lesquels elle agit sur l'aiguille. Après la percussion elle est un aimant à pôles fixes, et de quelque côté qu'on la retourne le même fluide se montre

toujours à la même extrémité. Ainsi la percussion donne au fer doux de la force coercitive ; cette force est sans doute locale, et n'existe que dans les molécules qui ont reçu le choc, car en retournant la barre, et en la frappant dans cette position inverse de la précédente, on parvient à l'aimanter en sens contraire. On peut ainsi renverser ses pôles autant de fois que l'on veut ; et ce qui est encore digne de remarque, c'est qu'après quelques jours, ou quelquefois même après quelques heures, la force coercitive a disparu, et il faut de nouveaux chocs pour la reproduire.

Cette expérience curieuse donne la clef d'un grand nombre de phénomènes, sur lesquels j'insisterai d'autant plus volontiers, que personne à ma connaissance n'en a donné la véritable explication. Tout le monde sait que les substances magnétiques sont presque toujours dans un état d'aimantation plus ou moins marqué. C'est un certain Jules César, chirurgien de Rimini, qui observa le premier la transformation du fer en aimant ; il fit cette remarque vers 1590, sur une barre de fer qui avait soutenu quelque construction en brique sur le sommet d'une tour de l'église de Saint-Augustin. Plus tard, vers 1630, Gassendi fit la même observation sur la croix du clocher de Saint-Jean d'Aix, qui était tombée frappée de la foudre ; il en trouva le pied consumé par la rouille et jouissant de toutes les propriétés de l'aimant. Depuis cette époque les observations se sont multipliées, et l'on a reconnu qu'un morceau de fer un peu rouillé est presque toujours un aimant plus ou moins fort ; qu'il en est de même de la fonte, de l'acier et des autres substances magnétiques ; enfin l'on a reconnu que la rouille, ou l'oxidation, n'est pas du tout nécessaire pour qu'un corps s'aimante, et qu'il suffit pour cela de lui faire subir quelque action mécanique, de le tordre, de le battre, de le limer ou de le tourmenter de quelque manière : par exemple, dans la boutique d'un serrurier tous les outils sont des aimans, et il n'est pas rare que les aiguilles, les

instrumens tranchans et les autres objets d'acier, présentent des traces de magnétisme polaire. Dans tous ces phénomènes, ce n'est ni l'action chimique ni l'action mécaniqui qui magnétisent les corps; mais c'est l'action de la terre, sans cesse agissante, qui décompose les fluides; et la décomposition une fois faite, elle est maintenue par la force coercitive, qui résulte des déplacemens chimiques ou mécaniques qu'éprouvent les molécules. Pour m'en assurer par l'expérience, il m'a suffi de comparer les quantités de magnétisme que prennent les corps, suivant la position qu'on leur donne, par rapport à la direction de la force terrestre. Dans une position verticale ils s'aimantent fortement, par l'oxidation ou par les actions mécaniques, et le pôle austral est toujours en bas. Dans des positions plus obliques, l'effet est moindre, mais toujours dans le sens voulu par le pôle boréal de la terre, qui est le pôle dominant dans nos climats. On peut même, d'après cette donnée, fabriquer de toutes pièces des aimans très-puissans, soit avec du fil de fer, soit avec des barres de fer ou d'acier. Pour aimanter des fils de fer sans aimant, il suffit d'en couper trente ou quarante bouts, de la longueur d'un pied par exemple, et en les tenant verticalement de les tordre sur eux-mêmes, un à un, jusqu'à les rendre raides et cassans; chacun d'eux devient fortement magnétique, et on les réunit ensuite pour en former deux faisceaux, avec lesquels on aimante les plus gros barreaux, par les procédés que nous ferons connaître. Pour aimanter sans aimant des barres de fer ou d'acier, il suffit de battre les premières en les tenant verticalement; et pour les secondes il suffit de les frotter dans le même sens, avec une barre de fer verticale.

Les aimans naturels n'étant que des oxides de fer, il est probable qu'ils doivent leurs propriétés magnétiques à l'action de la terre qui s'est exercée sur eux au moment de leur formation. Car les mines de fer qui existent de nos jours ne sont pas aussi anciennes que le monde. Et sans admet-

tre qu'à l'origine le fer fût dans son état pur et métallique, il est certain que les combinaisons dans lesquelles il est engagé à la surface du globe et dans toute l'étendue de la croûte que nous exploitons, ne furent pas toujours ce qu'elles sont aujourd'hui. Le travail chimique qui s'accomplit sans cesse et qui sans cesse se renouvelle depuis tant de siècles dans les entrailles de la terre, fait passer les molécules les plus inertes par une foule de combinaisons différentes, et change de mille manières leurs agrégations primitives. Les mines magnétiques sont soumises à des mutations perpétuelles comme les autres élémens pondérables, et l'on peut dire avec certitude qu'à chaque instant il y en a qui se décomposent, et qu'à chaque instant il y en a d'autres qui se forment et dont les pôles sont arrangés suivant les lois voulues par le magnétisme général de la terre. Telle est sans doute la cause première qui a développé du magnétisme dans les aimans naturels, soit dans ceux que possèdent les Chinois depuis plus de trois mille ans, soit dans ceux qui furent observés par Pythagore et par Platon, soit dans ceux que nous exploitons aujourd'hui et qui servent à nos recherches. Il n'y a donc à notre connaissance que le magnétisme développé qui puisse développer du magnétisme; cette conclusion a été rigoureuse jusqu'à la découverte de M. OErsted, qui a ouvert un nouveau champ dans les sciences en démontrant, comme nous le verrons dans un des livres suivans, que l'électricité aussi peut développer du magnétisme.

308. *De l'action de la terre sur le fer des vaisseaux, et des moyens de corriger la déviation que la boussole en éprouve.* — De grandes masses de fer sont employées dans nos vaisseaux; les unes font partie de la construction et restent fixes; les autres font partie de l'armement et sont plus ou moins mobiles, comme les canons de fer ou de fonte, les ancres, les câbles, les barriques et les outils de toute espèce. Tous ces corps magnétiques, dispersés çà et

là dans les différentes parties du bâtiment, doivent exercer sur la boussole et exercent en effet une action considérable. Les déviations produites par cette cause, méritent toute l'attention des physiciens; elles s'élèvent quelquefois à 15 ou 20 degrés, et fussent-elles quinze ou vingt fois moindres, elles seraient encore plus que suffisantes pour exposer les navigateurs à de très-grands dangers. Il paraît que c'est Wales, astronome de l'expédition de Cook, qui a, le premier, signalé cette source d'erreurs dans les observations à la mer; plus tard, leur véritable cause fut indiquée par Downie, et c'est le capitaine Flinders, célèbre par ses découvertes et par son intrépidité, qui fit le premier quelques essais heureux pour s'en mettre à l'abri. Tout récemment M. Bain a rappelé l'attention sur ce point important. Plusieurs officiers de la marine anglaise en ont fait l'objet de leurs recherches, et le professeur Barlow de Woolwich a été couronné par la Société Royale de Londres pour les heureux résultats auxquels il a été conduit en s'occupant de cette question. C'est l'ouvrage de M. Barlow qui nous servira de guide dans ce que nous allons dire.

Dans un vaisseau, l'aiguille de la boussole peut être déviée, 1° par les décompositions de fluide qu'elle excite elle-même dans les substances magnétiques; 2° par l'état magnétique permanent que ces substances peuvent avoir en vertu de leur force coercitive; 3° par l'état magnétique passager qu'elles prennent sous l'influence de l'aimant terrestre.

La première cause ne peut produire que de faibles effets; et l'on s'en garantit sûrement en plaçant l'*habitacle* à une distance assez grande de toutes les pièces de fer, ce qui est toujours possible.

La seconde cause aurait un remède facile; car l'aiguille aimantée se trouvant placée, à l'égard des divers pôles ou centres magnétiques du vaisseau, à une distance très-grande par rapport à sa longueur, il en résulte que chacun

de ces centres agit sur elle par un couple. Par la composition de tous ces couples partiels on aurait donc un couple résultant qui resterait toujours le même dans tous les climats et pour toutes les positions du vaisseau. Ce couple, à son tour, se composerait avec le couple terrestre, et c'est là ce qui produirait la déviation de l'aiguille. Mais, dans le même lieu, quand le vaisseau tournerait sur lui-même autour d'un axe vertical, le couple terrestre conservant la même direction dans l'espace, et le couple du vaisseau tournant avec lui, on voit qu'il en résulterait une déviation variable, susceptible d'un maximum à droite du méridien magnétique, et d'un autre maximum égal à sa gauche; de telle sorte que la moyenne entre ces deux positions extrêmes de l'aiguille donnerait sa vraie direction. Pour d'autres latitudes, le couple terrestre serait plus intense ou plus oblique, mais la déclinaison se trouverait encore de la même manière, par la rotation complète du vaisseau autour d'un axe vertical.

Enfin, la troisième cause est plus puissante que les deux premières, et ses effets, sans cesse variables, sont aussi plus difficiles à apprécier et à corriger. Nous allons pour un moment supposer qu'elle agisse seule pour dévier l'aiguille aimantée. Alors il est clair que tous les corps magnétiques du vaisseau deviennent des aimans à pôles changeans; quand le vaisseau tourne sur lui-même dans un sens ou dans l'autre, ces corps se présentent autrement à l'action de la terre, et éprouvent de sa part des décompositions différentes. Ces phénomènes, déjà si compliqués dans le même lieu, se compliquent encore, quand le vaisseau, sillonnant les mers, passe successivement dans des contrées où le couple terrestre change de direction ou d'intensité. Tous ces effets divers ne peuvent être ni prédits ni même indiqués par la théorie, et ce n'est que par des essais plus ou moins ingénieux que l'on peut les neutraliser. Voici les moyens que propose M. Barlow pour y parvenir.

Le bâtiment étant dans une rade tranquille où l'on peut le virer de bord, on choisit à quelque distance sur le rivage un lieu d'où l'on puisse l'apercevoir dans toutes les positions qu'il prend en tournant sur lui-même. Là s'établit un observateur avec une boussole et un théodolite, ou quelque autre instrument propre à mesurer les angles. Sur le vaisseau, près de la boussole déjà fixée dans l'habitacle, est un autre observateur, ayant aussi un instrument pareil. A un signal donné les observateurs visent l'un à l'autre, et chacun d'eux détermine l'angle de son aiguille avec l'axe de sa lunette. Puisque les observateurs se regardent, les axes des deux lunettes ne font qu'une seule et même ligne, que nous appellerons *la ligne centrale*. Or, la boussole du rivage n'éprouvant point de perturbation, il est évident que si la boussole du vaisseau n'en éprouvait pas, les deux aiguilles seraient parallèles et feraient le même angle avec la ligne centrale; car la distance de quelques centaines de pieds qui se trouve entre elles ne peut pas produire de changement sensible dans la déclinaison. Donc la différence de ces deux angles est la déviation produite par les corps magnétiques du vaisseau, à l'instant de l'observation. Concevons que, par des manœuvres qui sont toujours faciles pendant le calme, on fasse faire au vaisseau une révolution compiète, et qu'à chaque rumb de vent qu'il parcourt, ou à chaque angle de 10 ou 12 degrés dont il tourne, on fasse une observation pareille à la précédente, alors on aura pour chacune de ces positions la valeur de la déviation locale produite par les corps magnétiques dont il est chargé. On pourrait ensuite, s'il était nécessaire, trouver, par des interpolations, les déviations correspondantes à chaque degré. Cette première opération terminée, l'observateur du rivage enlève sa boussole, et à sa place il substitue celle du vaisseau, en la posant au même point, sur une espèce de cage en bois, qui peut faire une révolution complète autour de la verticale du pivot de l'aiguille. Cette cage est représentée dans

la *figure* 34. Sur l'un de ces côtés on voit, de distance en distance, des trous qui sont destinés à recevoir le *compensateur magnétique;* nous appellerons ainsi l'appareil qui doit corriger ou faire connaître la déviation produite par le fer du vaisseau.

Le *compensateur magnétique* se compose d'une tige T en cuivre rouge, d'un pouce et demi de diamètre, et de deux plaques de fer FF′ de 12 ou 13 pouces de diamètre (mesures anglaises), d'une épaisseur telle que le pied carré pèse 3 liv.; ces deux plaques sont séparées par une feuille de carton, et pressées l'une contre l'autre au centre par l'écrou extérieur de la tige de cuivre, et sur les bords par trois petits écrous en fer; voilà tout l'appareil: on le dispose comme il est représenté dans la *figure* 34. Alors la cage en bois emportant le compensateur dans son mouvement de rotation, l'aiguille de la boussole en est affectée diversement dans les différens azimuths, et, par des tâtonnemens, on arrive enfin à lui faire éprouver de la sorte toute la série des déviations qu'elle éprouvait sur le vaisseau. Cela fait, l'on marque soigneusement la position du centre de la plaque par rapport à l'aiguille de la boussole, et quand celle-ci a repris sa place sur le vaisseau, on ajuste le compensateur sur le pied qui la porte (*Fig.* 33), de manière qu'il ait à son égard exactement la même position.

Par ce moyen, la déviation semble doublée et non pas corrigée, puisque le compensateur produit un effet justement égal à celui que produit le fer du vaisseau et dans le même sens. Elle est doublée en effet, et c'est là ce qui donne le moyen de la trouver. D'abord on enlève le compensateur pour faire une première observation de déclinaison, et l'on trouve, par exemple, 36 degrés à l'ouest: ensuite on place le compensateur pour faire une seconde observation; l'on trouve, par exemple, 40 degrés à l'ouest. Ce second résultat étant plus fort que le premier, c'est une preuve que les actions locales augmentent la déclinaison.

La différence $40 - 36 = 4$, fait voir que le compensateur, pour sa part, l'augmente de 4 degrés, donc le fer du vaisseau l'augmente d'autant; ainsi la vraie déclinaison est $36° - 4° = 32°$. Au contraire, si l'observation faite avec le compensateur donnait un moindre résultat, ce serait une preuve que les actions locales diminuent la déclinaison, et la différence des deux observations devrait s'ajouter à la première pour avoir la déclinaison du lieu. Il faut donc dans tous les cas suivre cette règle générale : faire deux observations, l'une sans compensateur, l'autre avec le compensateur; retrancher la seconde de la première, et cette différence, *prise avec son signe*, étant ajoutée à la première observation, le résultat sera la déclinaison cherchée.

S'il se trouve, dans le vaisseau, des corps aimantés d'une manière permanente, il est évident que leur influence se trouve corrigée en même temps que celle qui résulte de l'action de la terre.

Cet ingénieux procédé n'est pas sans difficulté dans la pratique : 1° les changemens de température affectent diversement l'aiguille de la boussole, les plaques du compensateur et les diverses substances magnétiques du bâtiment; 2° toutes ces substances ont des forces coercitives plus ou moins persistantes, en vertu desquelles elles conservent dans chaque position une partie du magnétisme qu'elles avaient reçu dans des positions différentes; 3° il résulte des mêmes causes qu'en changeant de lieu le couple terrestre produit sur elles des effets qui ne peuvent être proportionnels. Il faut donc voir dans le compensateur de M. Barlow un appareil propre à atténuer les grandes déviations que la boussole éprouve à la mer, mais encore insuffisant dans sa forme actuelle pour les faire connaître avec exactitude.

309. *De l'influence du magnétisme sur la marche des chronomètres.* — Plusieurs marins, habiles observateurs, ont remarqué que leurs chronomètres n'avaient pas la même marche à bord et sur le rivage. Les différences s'é-

lèvent quelquefois de 5″ à 10″ par jour. On conçoit de quelle importance est ce phénomène, puisque toute l'exactitude des observations nautiques et géographiques que l'on peut faire à la mer est dépendante de l'exactitude avec laquelle on mesure le temps. Les chronomètres ayant dans leur construction plusieurs pièces d'acier, et surtout des pièces mobiles qui sont emportées par le balancier, il est naturel de supposer qu'ils sont par là soumis aux influences magnétiques. En effet, la proximité d'un aimant suffit pour altérer leur marche; de nombreuses expériences en ont donné la preuve, et l'on a reconnu aussi que des masses de fer doux, aimantées par la terre, produisent le même phénomène. Sur un vaisseau, c'est donc la même cause qui dévie la boussole et qui trouble la marche des chronomètres; aussi a-t-on essayé de la neutraliser dans les deux cas par le même moyen; mais, pour les chronomètres, ce qu'il y a jusqu'à présent de meilleur à faire, c'est de les tenir au même lieu, dans la même position, et le plus loin qu'il est possible de toute substance magnétique.

CHAPITRE III.

Des Lois et de la Théorie du Magnétisme.

310. *Divers moyens de comparer les forces magnétiques.* — Le premier moyen qui se présente pour estimer les forces relatives des aimans naturels ou artificiels consiste à les mettre en contact avec une même pièce de fer que l'on charge ensuite de poids graduellement croissans, jusqu'à l'instant où elle se détache, entraînée par le poids total, qui est alors la limite de ce que la force magnétique peut porter. Ce moyen ne peut donner qu'une grossière approximation : l'insuffisance en fut bientôt reconnue, et cependant il fut à peu près le seul dont on fit usage jusqu'en 1780. A cette époque, Coulomb, par ses belles découvertes, ouvrit de nouvelles routes dans la science, et il donna enfin des méthodes sûres pour mesurer, avec le dernier degré de précision, tous les effets des puissances magnétiques. Dans ce qui va suivre, nous aurons souvent recours aux Mémoires qu'il publia sur ce sujet (tom. 9 des Savans étrangers, Mémoires de l'Académie, 1784, 1785, 1789; et Mémoires de l'Institut, tom. 4 et 6).

Coulomb a employé avec avantage deux moyens différens pour mesurer la force des aimans, 1° les *oscillations* d'une aiguille suspendue à des fils de soie plate; 2° la *torsion* des fils de cuivre ou d'argent disposés dans un appareil qu'il nommait *balance de torsion*, et qu'on appelle aujourd'hui *balance de Coulomb*.

311. *Oscillations.* — Nous avons déjà dit (306) qu'un aimant qui oscille sous l'influence magnétique de la terre

peut être assimilé à un pendule composé; d'où il suit que, pour trouver la valeur absolue de la force qui le sollicite, il suffirait de connaître son moment d'inertie par rapport à l'axe de suspension, et la position exacte de ses pôles ou de ses centres magnétiques, et le nombre des oscillations qu'il fait dans un temps donné. Mais la force absolue, en vertu de laquelle un aimant accomplit ses oscillations, est un élément complexe dépendant à la fois de l'intensité du magnétisme qu'il possède, et de l'intensité du magnétisme que possède le corps qui agit sur lui; car l'une ou l'autre de ces intensités devenant double; par exemple, la force résultante serait double aussi, et elle deviendrait quadruple si les deux intensités étaient l'une et l'autre doublées. Faute de pouvoir déterminer une intensité magnétique d'une manière absolue, nous sommes réduits à comparer entre elles les résultantes totales qui impriment le mouvement. Alors le problème devient plus simple; les changemens d'intensité n'apportant pas de changemens sensibles dans la position des pôles, l'axe de rotation reste invariable ainsi que les momens d'inertie, et il est permis en conséquence de s'appuyer sur ce principe, *que les forces magnétiques qui sollicitent un aimant sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations qu'il exécute dans un temps donné.* D'après cela nous pouvons comparer les forces magnétiques que possède un corps, soit qu'il puisse osciller lui-même, soit qu'il doive rester fixe dans des positions déterminées.

1°. Pour constater l'état magnétique d'une aiguille, on la suspend horizontalement dans une chape de papier ou de métal à un assemblage de fil sans torsion (1); et l'on

(1) Pour donner à ces fils beaucoup de force, on réunit parallèlement des fils de cocon, on y attache un poids, et pendant qu'ils sont également tendus, on les humecte à plusieurs reprises avec de l'eau gommée, en les pressant de haut en bas entre les doigts. Le poids reste jusqu'à ce qu'ils soient secs et bien agglutinés.

compte le nombre N des oscillations qu'elle exécute dans un temps donné, dans 10′, par exemple, sous l'influence de la force de la terre. Ensuite, si par des moyens quelconques, on a changé son intensité, *sans toutefois changer la position de ses pôles*, et que l'on veuille comparer ce second état au premier, il suffit de la suspendre de la même manière, et de compter de nouveau le nombre N′ des oscillations qu'elle fait dans le même temps de 10′; le rapport de ces deux intensités magnétiques M et M′ sera donné par la proportion

$$\frac{M}{M'} = \frac{N^2}{N'^2}.$$

Si, par exemple, on a pour le premier cas N=71, et pour le deuxième N′=100, on aura

$$\frac{M}{M'} = \frac{5041}{10000} = 0{,}5041,$$

c'est-à-dire que la seconde force est presque double de la première. Ce résultat suppose que l'action de la terre a été la même dans les deux cas; ce qui est sensiblement vrai quand on opère dans le même lieu et à des époques qui ne sont pas très-éloignées.

2°. Pour comparer les divers degrés de force d'un aimant qui ne peut être suspendu pour osciller lui-même, on le fait agir, dans ses différens états magnétiques, sur une petite aiguille d'épreuve ayant une grande force coercitive, de peur que son magnétisme ne soit décomposé par influence; mais d'abord on constate l'état de cette aiguille, soumise à l'action seule de la terre. Soit N le nombre des oscillations qu'elle fait dans un temps donné, par l'effet de la composante horizontale M, du magnétisme terrestre; soit N′ le nombre des oscillations qu'elle fait dans le même temps, sous l'influence de la terre et de l'aimant, M′ étant alors la somme des composantes horizontales qui agissent

sur elle; soit N'' le nombre des oscillations qu'elle fait, toujours dans le même temps, pour un autre état de l'aimant, M'' étant la somme des composantes horizontales correspondantes. Pour la première et la seconde expérience, on aura

$$\frac{M'}{M} = \frac{N'^2}{N^2};$$

pour la première et la troisième on aura

$$\frac{M''}{M} = \frac{N''^2}{N^2}.$$

Mais, en supposant que l'aimant dont on cherche la force soit placé, dans les deux cas, de manière que sa composante horizontale soit aussi dans le méridien magnétique, et conspirante avec celle de la terre, il est évident que sa force est dans le premier cas $M' - M$, et dans le second cas $M'' - M$; or, la première et la seconde équation donnent respectivement

$$\frac{M' - M}{M} = \frac{N'^2 - N^2}{N^2} \text{ et } \frac{M'' - M}{M} = \frac{N''^2 - N^2}{N};$$

d'où l'on tire

$$\frac{M' - M}{M'' - M} = \frac{N'^2 - N^2}{N''^2 - N^2}.$$

Tel est le rapport des deux composantes horizontales de l'aimant, dans les deux états ou dans les deux positions successives où il a été placé par rapport à l'aiguille.

Si, par exemple, l'aiguille d'épreuve fait 30 oscillations en 10′, quand la terre agit seule, qu'elle en fasse 40 quand un aimant agit sur elle dans son premier état et 50 quand il agit dans son second état, on aura

$$N = 30,\ N' = 40,\ N'' = 50;$$

et les deux composantes horizontales de cet aimant seront entre elles comme 700 est à 1600, ou comme 7 est à 16.

312. *Balance de torsion.* — Lorsqu'un fil de métal est tendu verticalement par un certain poids, il prend une position d'équilibre; et si l'on fait tourner le poids sur lui-même, d'une ou de plusieurs révolutions, ou seulement d'un angle de quelques degrés, le fil éprouve une torsion dans toute sa longueur, et fait un effort pour revenir sur lui-même et pour ramener le poids à sa position primitive. Coulomb a étudié le premier cette force de torsion, et nous allons énoncer les lois remarquables auxquelles il a été conduit; nous reviendrons sur ce sujet dans le Livre des Actions moléculaires.

1°. La force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion;

2°. Elle est, dans un même fil en raison inverse de sa longueur et indépendante de sa tension;

3°. Pour des fils de même substance et de différente épaiseur elle est proportionnelle à la quatrième puissance des diamètres.

Ces lois ont été vérifiées sur les cheveux, sur la soie et sur les fils d'argent, de fer et de laiton de différens diamètres.

La balance dans laquelle on mesure la force magnétique, par cette force de torsion, est représentée dans les *figures* 38, 35 et 36 : la *figure* 38 représente tout l'appareil mis en expérience, la *figure* 35 est une coupe horizontale correspondant à l'extrémité inférieure du fil, et la *figure* 36 représente le *micromètre* supérieur. Ce micromètre est composé de la manière suivante : ss′ est une plaque circulaire qui termine le cylindre LL′; elle est percée en son centre d'une large ouverture o; MM′ est un disque mobile s'appliquant exactement sur la plaque ss′, tournant sur elle à frottement très-doux, et maintenu dans son mouvement de rotation par une petite douille qui s'élève du mi-

lieu de ss′; vers le centre *c* de MM′ est un trou triangulaire, dont l'un des angles aboutit exactement au centre; c'est dans cet angle que passe le fil *fl* : de là il vient s'attacher au treuil *t*, qui est supporté par deux pièces fixes *p* et *p′* sur lesquelles il peut tourner. La plaque ss′ est divisée sur tout son contour, et le disque MM′ porte un point de repère, qui parcourt ces divisions et qui indique par conséquent les divers degrés de torsion qu'on donne au fil à son extrémité supérieure. Dans la *figure* 38, on voit la pince qui s'attache à l'extrémité inférieure du fil; elle porte une espèce d'étrier en cuivre mince dans lequel on met les aiguilles aimantées; et pour éviter des oscillations trop prolongées, on adapte à l'étrier un volant qui plonge dans un vase rempli d'eau. Sur le contour de la cage on colle une bande de papier portant des divisions de degrés en degrés, dont la grandeur est déterminée par le prolongement des rayon, tels que *cr*, *cr′*, etc. Le fil doit occuper le centre de ces divisions, et cette condition est remplie quand un rayon visuel quelconque tombe sur deux divisions diamétralement opposées, par exemple, sur 0 et 180, sur 90 et 270, etc.

La balance étant ajustée, on détermine la position d'équilibre du fil en plaçant dans l'étrier une aiguille non aimantée; après quoi l'on y place une aiguille aimantée, et l'on tourne le micromètre supérieur dans un sens ou dans l'autre, jusqu'à ce que le plan d'équilibre du fil coïncide avec la direction de cette aiguille; alors on est sûr qu'elle est dans le méridien magnétique, et que le fil est sans torsion. Supposons maintenant que l'on tourne le micromètre pour écarter l'aiguille de sa position, pour la porter par exemple en VA′ (*Fig.* 35), de manière qu'elle forme avec le méridien MM′ un angle AVA′ de 20°; soit 180° l'angle dont on le tourne; le fil à son extrémité inférieure n'ayant marché que de 20°, la torsion qui lui reste est 180° — 20° ou 160°; c'est cette force qui fait équilibre à la *force direc-*

trice de la terre, c'est-à-dire à la composante horizontale qui tend à ramener l'aiguille dans le méridien magnétique. Soit M l'intensité de la force horizontale terrestre F A′; elle peut se décomposer en deux, l'une P A′ qui se détruit, ou du moins qui ne fait pas tourner l'aiguille, et l'autre T A′ qui est tout entière efficace; la valeur de celle-ci est M *sin.* V en représentant par V la *déviation* AVA′. Au dessous de 15 à 20°, les angles peuvent sensiblement être pris pour les sinus, et dans ces limites la force directrice est donc exprimée par MV.

Dans l'exemple qui nous occupe V = 20°; ainsi 20° M est la force qui est balancée par une torsion de 160°: et puisque la force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion, il en résulte enfin que pour 1° de déviation la force directrice serait seulement de $\frac{160}{20} = 8$. En général, nous remenerons ainsi la force directrice à 1° de distance.

La même aiguille ayant reçu une autre quantité de magnétisme, il faudrait, par exemple, tourner le micromètre de 495° pour l'écarter de 15°; sa force directrice serait alors $\frac{495-15}{15} = \frac{480}{15} = 32$. Elle serait donc exactement quadruple de ce qu'elle était dans la première expérience.

Pour déterminer la force d'un aimant qui ne peut être lui-même horizontalement suspendu dans la balance, on le fait agir sur l'aiguille de l'expérience précédente, et pour plus de simplicité on le dispose de manière que son centre d'action tombe sensiblement en A (*Fig.* 35). Alors on tourne le micromètre pour obtenir une déviation moindre que 20°, et il est facile de voir comment les expériences s'achèvent, soit que l'aimant qu'on éprouve agisse par attraction ou par répulsion. Dans le premier cas la force directrice est la somme des actions de la terre et de l'aimant; dans le second cas, elle est leur différence.

313. *Les attractions et les répulsions magnétiques sont en raison inverse du carré de la distance.* — Cette loi fondamentale du magnétisme avait été soupçonnée par

quelques physiciens, mais c'est Coulomb qui en a le premier donné la démonstration rigoureuse par les deux méthodes dont nous venons de parler.

1°. *Par les oscillations.* Une petite aiguille d'épreuve, suspendue à un fin de cocons, est mise à l'abri des agitations de l'air; elle fait quinze oscillations en 1′; soit M la force horizontale de la terre qui la sollicite. On fait agir sur elle le pôle attractif d'un long fil d'acier, fortement aimanté et maintenu verticalement dans le plan du méridien magnétique.

Par des expériences préparatoires on reconnaît que, pour obtenir le plus grand effet possible, il faut que l'extrémité agissante du fil d'acier *dépasse* de 10 lignes environ le plan horizontal de l'aiguille : on supposera donc que le fil est ainsi disposé.

Dans une première expérience, l'aiguille étant à 4 pouces de distance du fil, elle fait 41 oscillations en 1′; soit M′ la force qui agit sur elle.

Dans une deuxième expérience, l'aiguille étant à 8 pouces de distance, elle fait 24 oscillations en 1′; soit M″ la force qui agit sur elle. On a

$$\frac{M'}{M} = \frac{(41)^2}{(15)^2} \qquad \frac{M''}{M} = \frac{(24)^2}{(15)^2}.$$

La force horizontale du fil est M′ — M dans la première expérience, et M″ — M dans la seconde; et il résulte des deux équations précédentes :

$$\frac{M'-M}{M''-M} = \frac{(41)^2-(15)^2}{(24)^2-(15)^2} = \frac{1456}{351} = 4,1.$$

Ainsi, dans la deuxième expérience, où la force est à une distance double, son intensité est à peu près quatre fois plus petite.

Pour de plus grandes distances on trouve la même loi, pourvu qu'on ait soin de corriger les résultats de l'influence du pôle répulsif du fil, qui devient alors sensible.

2°. *Par la torsion.* Il faut aussi, dans cette méthode, employer des fils très-longs, afin d'éviter l'influence des pôles qui ne sont pas en présence. Les fils de Coulomb avaient 24 pouces de longueur, sur 1 ligne $\frac{1}{2}$ de diamètre. Celui de ces fils qui était dans la balance avait une force directrice de 35° de torsion pour 1° de distance (312); un second fil pareil, et aussi très-fortement aimanté, fut placé verticalement dans la balance, son pôle répulsif en bas, et son extrémité inférieure tombant à un pouce environ au dessous du niveau de l'autre; de telle sorte que, si le premier n'eût pas été repoussé, leur point de *recoupement* ou de croisement se serait trouvé à un pouce des extrémités de chacun. Mais le fil suspendu fut chassé vivement, et il ne s'arrêta qu'à 24° du méridien magnétique; c'est ce que nous appelons sa première position. Pour lui en donner une deuxième, le micromètre supérieur fut tourné de trois circonférences ou 1080° et le fil se rapprocha à 17° du méridien. Enfin, pour lui en donner une troisième, le micromètre fut encore tourné de cinq circonférences, ce qui fait en tout huit circonférences ou 2880°, et cette fois il se rapprocha à 12° du méridien.

Dans la première position, l'aiguille suspendue était rappelée dans le méridien par la force terrestre et par la torsion de 24° du fil. Or, la force terrestre étant, comme nous avons dit, de 35° de torsion pour 1° d'écart; pour 24° elle était de 840° qui donnent, ajoutés à 24, une force totale de 864°.

Dans la deuxième position elle était rappelée par la force terrestre agissant à 17°, et équivalant par conséquent à $35 \times 17 = 595$ degrés de torsion, et par la torsion du fil qui était de $1080 + 17 = 1097$, ce qui fait 1692.

Dans la troisième position, par la force terrestre agis-

sant à 12°, et équivalant à $35 \times 12 = 420$, et par la torsion qui était de $2880 + 12 = 2892$, ce qui fait 3312.

Ainsi, les distances étant 24, 17 et 12, les forces répulsives correspondantes sont 864, 1097 et 1692, ce qui donne à très-peu près la raison inverse du carré des distances.

Il est facile de voir comment la même méthode conduirait à déterminer la loi des attractions.

Ces forces, sur lesquelles nous venons d'opérer, sont, il est vrai, des résultantes de toutes les actions partielles du magétisme des aimans et du magnétisme de la terre; mais comme des attractions planétaires qui s'exercent sur des masses prodigieuses on a pu déduire les actions de toutes les molécules de la matière pondérable, de même, pour les fluides magnétiques, nous pouvons conclure que la loi des résultantes que nous observons est véritablement la loi élémentaire suivant laquelle toutes les parcelles de substance magnétique se sollicitent l'une l'autre. Ainsi, nous sommes conduits à cette vérité qui doit être le fondement de toute théorie, savoir, que les molécules du même fluide se repoussent, et que les molécules de fluide contraire s'attirent en raison inverse du carré de la distance.

314. *Distribution du magnétisme dans les aimans de différentes formes, et détermination des pôles.* — Les deux méthodes qui viennent de nous conduire à la découverte des lois attractives et répulsives du magnétisme, peuvent nous servir encore à la détermination des intensités magnétiques en chaque point d'une aiguille aimantée.

Une petite aiguille d'épreuve de 6 lignes de longueur, suspendue à un fil de cocon, fait N oscillations en 1′, sous l'influence de la force M, composante horizontale de la terre. On lui présente, à la distance de quelques lignes, un fil aimanté vertical A B (*Fig.* 37), qui ne la détourne point du méridien, mais qui la fait osciller plus vivement; elle exécute alors N′ oscillations en 1′: soit M′ la force qui la sollicite. A une petite distance, la section s' qui se trouve vis-

à-vis l'aiguille et les sections voisines, telles que a et b, agissent avec toute leur énergie, tandis que les autres agissent avec une obliquité toujours croissante, et par conséquent avec une force toujours moindre. Nous pouvons donc considérer la force actuellement agissante de l'aimant comme appartenant à la section s'. De même, si nous présentons l'aiguille à la même distance, vis à-vis la section s'', nous aurons N'' oscillations en 1′; M'' étant la force qui produit cet effet, nous aurons

$$\frac{M' - M}{M'' - M} = \frac{N'^2 - N^2}{N''^2 - N^2}.$$

Les forces $M' - M$ et $M'' - M$ sont les intensités magnétiques de l'aimant, pour les points qui sont en présence de l'aiguille, et nous pouvons de la sorte comparer les intensités des différentes tranches dans toute la longueur des fils ou des barreaux aimantés. Seulement, quand on arrive vis-à-vis l'extrémité A, il faut doubler l'effet obtenu, puisqu'on aurait visiblement un effet double, si l'aimant se continuait encore et donnait au dessous de A des tranches aussi efficaces que celles qui sont au dessus. On peut exprimer géométriquement ces résultats en élevant sur les diverses tranches des perpendiculaires qui représentent les intensités observées. Les extrémités de ces perpendiculaires formeront une courbe que l'on appelle la courbe des intensités, et qui indique à l'œil toute la distribution des fluides magnétiques. La *Fig.* 43 représente la courbe trouvé par Coulomb, pour un fil d'acier de la longueur A B. Au milieu l'intensité est nulle, et de là elle va croissant jusqu'à l'extrémité. Pour les fils ou pour les lames de longueur différente, cette courbe est exactement la même, pourvu que la longueur surpasse 6 ou 8 pouces; elle ne fait alors que se transporter vers les extrémités, laissant vers le milieu un espace plus ou moins grand ou l'intensité est sensiblement nulle. Il résulte de là cette propriété remarquable : qu'au dessus de 6 ou 8

pouces de longueur, tous les aimans de même forme ont leurs pôles à la même distance des extrémités; car les pôles n'étant que les points d'application des résultantes totales, ces points sont placés de la même manière, dès que les intensités ou les composantes partielles suivent la même loi.

De plus, Coulomb a fait voir, par le calcul, que les pôles se trouvent à dix-huit lignes des extrémités; et en même temps il a donné, pour les aimans très-courts, cette autre loi: que leurs pôles sont à peu près au tiers de la demi-longueur, ou au sixième de la longueur totale, en partant des extrémités. Ce dernier résultat est une sorte de limite dont les pôles s'approchent de plus en plus à mesure que la longueur diminue. Ainsi, pour une aiguille de trois pouces, par exemple, les pôles seront à une distance un peu plus grande que six lignes, c'est-à-dire à 7 ou 8 lignes.

Ces résultats supposent que les aimans ont des dimensions transversales très-petites par rapport à leur longueur, qu'ils sont d'une forme régulière dans toute leur étendue, et aussi qu'ils sont régulièrement aimantés. Quand ces conditions ne sont pas remplies, on ne peut plus connaître les pôles théoriquement; il faut alors les chercher directement avec la petite aiguille d'épreuve. Dans les losanges, les pôles se rapprochent du centre; dans les aiguilles en flèche qu'on a coutume d'employer, il est difficile d'avoir une aimantation régulière et des pôles constans; dans les plaques larges ou épaisses par rapport à leur longueur, il y a généralement des pôles multiples ou des points conséquens; enfin, dans les anneaux d'acier très-homogènes, on peut obtenir des pôles ou diamétralement ou irrégulièrement opposés; mais l'aimantation régulière ne laisse apercevoir au dehors aucune trace de magnétisme; cette propriété est une conséquence de la théorie dont nous allons essayer de donner une idée.

315. *Théorie du magnétisme.* — Les anciens ne connaissaient de l'aimant que son attraction pour le fer, et

c'est sur ce seul fait que pouvaient rouler leurs explications; or, dans tous les siècles, quand on a voulu à toute force expliquer un fait unique en son espèce, on n'a pu faire autre chose que d'exprimer le fait lui-même, par des mots vagues et métaphoriques, ou d'exprimer quelque liaison qu'on lui suppose avec un autre fait plus général. Thalès et Anaxagore disaient donc que l'aimant est doué d'une âme capable d'attirer et de mouvoir le fer; Cornélius Gemma (1535), qu'il y avait entre le fer et l'aimant des fils rayonnans invisibles; d'autres qu'il y avait une sympathie; d'autres une similitude; d'autres une différence de parties: toutes explications qui n'expriment que le fait. Epicure supposait que les atomes de fer conviennent à ceux de l'aimant, et qu'ils s'accrochent; Plutarque imaginait qu'il y avait autour de l'aimant une émanation capable de faire le vide; d'autres aimaient mieux supposer des vapeurs: Cardan prétendait que le fer est attiré parce qu'il est froid, et Costeo de Lodi, médecin, regardait le fer comme la nourriture de l'aimant: en comparant ainsi les phénomènes magnétiques à quelque autre phénomène naturel, on pouvait multiplier les hypothèses, et l'on n'a pas manqué de les multiplier à l'infini. Gilbert fut assez hardi pour condamner toutes ces explications et autres pareilles; en même temps il fut assez bon philosophe pour n'en proposer aucune à leur place. Descartes vint ensuite avec ses tourbillons et sa matière cannelée; comme il expliquait tout, il expliqua le magnétisme; son système fut adopté, et pendant plus d'un siècle il fut couronné dans les ouvrages de ses disciples. Descartes suppose qu'un tourbillon de matière subtile passe rapidement sur la terre, allant de l'équateur vers chacun des pôles; la matière ne l'arrête pas parce qu'elle est poreuse, mais les substances magnétiques ayant des molécules rameuses fort mêlées et tissues ensemble, opposent au tourbillon une résistance plus grande que tous les autres corps; voilà pourquoi elles sont dirigées. Cepen-

dant le tourbillon passe plus facilement dans un sens que dans l'autre, car il y a toujours une des extrémités qui se tourne de préférence vers le nord; donc, ajoute Descartes, les pores du fer sont hérissés de poils qui cèdent et se courbent, quand le tourbillon entre par un côté, mais qui se hérissent quand il veut entrer par le côté opposé. Au lieu de poils on peut concevoir des valvules ou un autre empêchement quelconque. Telles sont les idées fondamentales du système par lequel on a expliqué les phénomènes magnétiques jusqu'au temps d'Æpinus. Nous ne savons aujourd'hui ce qui doit le plus nous étonner, ou que la puissante intelligence de Descartes ait inventé de telles explications, et s'y soit arrêtée, ou que cent ans après ce philosophe, les hommes les plus éminens de leur siècle, comme Euler et Daniel Bernouilli, n'aient pu que reproduire ce système, en le fortifiant de leur autorité et de leur approbation.

Æpinus essaya enfin de soumettre au calcul tous les phénomènes magnétiques, et de montrer qu'ils peuvent se déduire des simples lois de l'attraction et de la répulsion; c'était revenir à la vraie méthode expérimentale, et soulever cette espèce de voile dont l'esprit de système enveloppe la réalité des choses. On rapporte qu'après avoir lu l'ouvrage d'Æpinus, plusieurs partisans de Descartes ne concevaient plus comment leur intelligence avait pu se prêter à l'invention des molécules rameuses et de la matière cannelée; tant il est vrai que notre conviction peut souvent résulter des combinaisons d'idées les plus extravagantes, et qu'il suffit d'un trait de lumière pour en montrer toute la fausseté.

Æpinus n'avait admis qu'un seul fluide magnétique: après lui, et tout en conservant ses principes, on supposa qu'il y avait deux fluides différens; que leur combinaison faisait l'état naturel, et leur séparation l'état magnétique. Mais l'on supposait aussi que ces fluides, une fois séparés,

pouvaient librement traverser les corps et se répandre dans leur masse.

Enfin Coulomb posa les vrais principes de la théorie que nous admettons aujourd'hui; il conserva les deux fluides, mais il fit voir que ces fluides ne peuvent éprouver dans les corps qu'un déplacement insensible : c'est ce qui résulte en effet des expériences que nous avons rapportées. Ainsi, nous supposons 1° que le *volume apparent* d'une substance magnétique se trouve composé d'une multitude de petits espaces, dans lesquels il y a du magnétisme, et d'une multitude d'autres petits espaces où le magnétisme n'existe pas; 2° que les deux fluides contenus dans chaque petit espace magnétique peuvent être séparés quand la force qui les sollicite est capable de vaincre la force coercitive; qu'ils peuvent s'arranger suivant les lois voulues par l'équilibre, mais qu'ils ne peuvent jamais sortir de la petite étendue dans laquelle ils ont été primitivement enfermés; tout ce qui les environne leur est imperméable.

Les petits espaces où il se trouve du magnétisme s'appellent les *élémens magnétiques;* les petits espaces où il ne s'en trouve pas s'appellent les *élémens non magnétiques*. Nous ne savons pas si les élémens magnétiques sont les intervalles qui séparent les atomes ou s'ils sont les atomes eux-mêmes; et nous ne savons pas non plus s'ils sont des intervalles d'une agrégation d'atomes, ou d'une molécule secondaire, ou s'ils sont les agrégations ou les molécules elles-mêmes. La somme des élémens magnétiques et celle des élémens non magnétiques forment le volume apparent d'un corps; le rapport de ces deux sommes peut changer avec la température et avec la nature des substances, et ces changemens ont une grande influence sur la distribution et sur l'intensité du magnétisme.

M. Poisson a dernièrement soumis à un calcul rigoureux ces principes de la théorie de Coulomb; les équations générales auxquelles il est parvenu ne peuvent pas encore se

résoudre dans tous les cas ; mais les conditions particulières sous lesquelles les intégrations sont possibles permettent déjà de nombreuses comparaisons entre les résultats de la théorie et ceux de l'expérience. L'accord est si remarquable que l'on peut dire, sans trop présumer de la savante analyse de M. Poisson, qu'elle reproduit l'ensemble des phénomènes du magnétisme, et qu'ainsi elle donne aux hypothèses de Coulomb une rigueur et une précision satisfaisante.

CHAPITRE IV.

Des procédés d'Aimantation, et des causes qui modifient la force coercitive.

316. *Procédé de Duhamel* ou *de la touche séparée.* — Ce procédé consiste à disposer bout à bout, sur une même ligne et à une certaine distance (*Fig.* 48), deux puissans faisceaux, F et F′, dont les pôles opposés se regardent. (On n'a représenté que leurs extrémités; ils sont semblables à celui de la *figure* 40); sur ces faisceaux, qui restent *fixes* pendant l'expérience, on place l'aiguille à aimanter de telle sorte qu'elle empiète au plus de 15 à 18 lignes sur chaque extrémité, ou seulement de 7 à 8 lignes, si elle n'a que 3 ou 4 pouces de longueur. Alors on prend les deux barreaux glissans, G et G′, l'un dans la main droite, l'autre dans la main gauche, on les pose au milieu de l'aiguille, on les incline sur elle de 25 ou 30°, et en les séparant on les fait glisser sous cette inclinaison, d'un mouvement lent et uniforme, pour qu'ils arrivent en même temps à chacune de ses extrémités; là, on les *relève*, on les rapporte au milieu, et l'on répète la même opération jusqu'à ce que l'aiguille ait reçu le nombre des frictions nécessaires. Quand l'aiguille est trop mince ou trop fragile pour supporter le poids des barreaux glissans, on la soutient par une pièce de bois L, sur laquelle on peut même la fixer pour qu'elle n'éprouve aucun déplacement pendant l'opération. Il est évident que chacun des barreaux G et G′ doit toucher l'aiguille par le même pôle que le barreau fixe vers lequel il marche. Ce procédé est le plus avantageux pour aimanter de la manière la plus complète et la plus régulière, les ai-

guilles de boussole et les lames dont l'épaisseur ne dépasse passe 4 ou 5 millimètres.

317. *Procédé d'Æpinus* ou *de la double touche.* — Quand les lames ont une épaisseur plus grande que 4 ou 5 millimètres, la méthode dont nous venons de parler est insuffisante pour les aimanter à saturation, et il est nécessaire alors de recourir au procédé d'Æpinus, qui ne diffère du premier que par la disposition et le mouvement des barreaux glissans. Ces barreaux sont encore l'un et l'autre posés au milieu de la lame, chacun la touchant par le pôle de même nom que celui de l'aimant fixe, dont il est le plus voisin (*Fig.* 47); mais cette fois leur inclinaison sur elle est seulement de 15 ou 20°, et on les promène *ensemble*, du milieu vers l'une des extrémités, puis de cette extrémité vers l'autre, en parcourant toute la longueur de la lame; puis on revient au milieu, où l'on enlève les barreaux glissans. Si l'on veut donner un plus grand nombre de frictions, il suffit de répéter plusieurs fois le mouvement de *va et vient*, d'un bout de la lame à l'autre, avec la double condition de finir toujours au milieu, et d'y arriver en revenant de l'extrémité de droite, si on a commencé les frictions en allant vers la gauche ou réciproquement; c'est le seul moyen de passer le même nombre de fois sur chaque moitié. Pour rendre cette manœuvre plus commode, on peut fixer les aimans glissans dans une espèce de triangle en bois ou en cuivre; mais, dans tous les cas, il faut avoir soin de laisser entre leurs extrémités inférieures une distance de 5 ou 6 millimètres, qui se conserve toujours la même, au moyen d'une petite lame L, de bois, de cuivre ou de plomb.

Ce procédé fut imaginé par Æpinus, dont il conserve le nom, et on l'appelle aussi *procédé de la double touche*, parce que les barreaux glissans *touchent à la fois* la même moitié de la lame qu'on aimante; tandis que dans le procédé de Duhamel ils *touchent séparément* chacune de ses moitiés.

La double touche est préférable à *la touche séparée*, lorsqu'il s'agit d'aimanter des barreaux épais, parce qu'elle y développe une plus grande quantité de magnétisme; mais elle ne doit jamais être employée lorsqu'il s'agit des aiguilles de boussole ou des lames destinées à des recherches de précision, parce qu'elle présente deux inconvéniens qu'il faut alors soigneusement éviter : premièrement, elle donne *toujours* des pôles d'une force inégale; secondement, elle donne souvent des points conséquens, surtout quand les lames ont une grande longueur. Ces deux inconvéniens sont rendus sensibles par des expériences analogues à celles des figures 5 et 15 : dans le premier cas, on voit que la ligne moyenne n'est pas au milieu, et il paraît qu'en général elle se trouve plus près de l'extrémité qui a été touchée la dernière; dans le second cas on aperçoit de petits centres d'attraction, qui font perdre aux courbes de limaille la régularité qu'elles prennent par l'influence des deux pôles.

318. *Du point de saturation.* — La quantité de magnétisme que *prend* un corps, va toujours croissant avec la force des barreaux qui servent à l'aimanter; mais la quantité de magnétisme qu'il *conserve* est susceptible d'une certaine *limite*, que l'on appelle *le point de saturation*. Par exemple, une aiguille qui fait seulement 100 oscillations en 100″ lorsqu'on l'aimante avec de faibles barreaux, peut faire ces 100 oscillations en 90″, en 80″, en 70″, etc., lorsqu'on l'aimante par l'une ou l'autre des méthodes précédentes, avec des barreaux fixes ou glissans d'une force graduellement croissante. Mais ensuite, abandonnée à elle-même après chacune de ces opérations, elle présente les phénomènes suivans : au dessous d'une certaine intensité magnétique, par exemple, de celle qui répond à 100 oscillations ou en 40″, elle conserve tout le magnétisme qu'elle a reçu; c'est-à-dire qu'après des mois ou des années, elle mettra à faire 100 oscillations le même temps qu'elle mettait immédiatement après l'aimantation; mais les intensités

plus grandes, celles qui lui font faire 100 oscillations en 30″ ou en 20″, décroîtront plus ou moins rapidement avec le temps; l'aiguille retombera enfin au point de faire ses 100 oscillations en 40″, et cette limite d'intensité sera son point de saturation. Il est évident, d'après cela, que le point de saturation d'une lame ou d'une aiguille ne dépend que de sa force coercitive, et nullement de la force des aimans qui ont servi à développer son magnétisme.

On prétend en général, que les corps *sursaturés* de magnétisme, retombent *immédiatement* au point de saturation; mais dans le cours de mes recherches magnétiques, j'ai pu observer des corps très-variés dans leur nature, dans leurs dimensions et dans les degrés de leur force coercitive, et j'ai toujours éprouvé que le point de saturation n'est pas une limite aussi fixe qu'on le suppose : premièrement, il y a toujours après l'aimantation *une réaction des fluides*, qui change leur arrangement, et qui augmente quelquefois l'intensité magnétique; secondement, les aiguilles sursaturées perdent très-lentement l'excès de leurs fluides, et il n'est pas rare, après plusieurs mois, de les voir encore éprouver quelques légères variations. Il est inutile d'ajouter qu'il faut dans ces observations tenir compte des changemens de température, et des autres causes accidentelles qui pourraient avoir de l'influence sur les intensités magnétiques.

Pour reconnaître qu'une aiguille est aimantée à saturation, il n'y a d'autres moyens que de la *réaimanter dans le même sens*, avec des barreaux plus puissans que ceux qui l'ont aimantée la première fois. Si elle prend alors une intensité beaucoup plus grande, ce dont on s'assure par l'une des méthodes que nous avons indiquées (311 et 312), il est certain qu'elle n'était pas saturée, et si elle ne prend qu'une faible augmentation d'intensité, quelle perd ensuite avec le temps, ce sera une preuve qu'elle était portée au point de saturation.

Il ne faudrait pas croire que l'on peut augmenter indéfiniment l'intensité magnétique d'une aiguille, en lui donnant un grand nombre de frictions avec de faibles barreaux: passé un certain terme, les nouvelles frictions n'ajoutent rien, et ce terme arrive quand la résistance de la force coercitive est égale à la puissance décomposante des barreaux.

Il ne faudrait pas croire non plus qu'une aiguille, aimantée par de puissans barreaux, pût, sans inconvénient, être réaimantée ensuite par des barreaux glissans, d'une moindre intensité; car ceux-ci, même quand ils agissent dans le même sens que les premiers, lui font perdre peu à peu de son magnétisme, et le ramènent enfin au degré d'intensité qu'ils auraient pu lui donner. Cet effet remarquable est une nouvelle preuve que les barreaux glissans ne magnétisent qu'en déterminant, dans chaque molécule, des décompositions et des recompositions successives des deux fluides.

319. *De l'influence de la trempe sur la force coercitive.* —Le plus sûr moyen de tremper l'acier à divers degrés comparables entre eux, est de lui donner d'abord la *trempe la plus dure*, et ensuite de le *recuire* graduellement, jusqu'à un point déterminé; en sorte que *les divers degrés de trempe* ne sont véritablement que *les divers degrés de recuit.*

Pour donner à un barreau d'acier la trempe la plus dure, on le chauffe jusqu'au rouge *cerise clair*, ou jusqu'au rouge *blanc*, et on le jette rapidement dans une grande masse d'eau froide. Le prompt refroidissement fait la trempe; ainsi, pour qu'il reçoive une trempe égale, et pour qu'il ne se *tourmente* pas, il importe que le froid l'enveloppe et le saisisse instantanément dans toutes ses parties. On peut tremper l'acier dans l'huile, dans le suif, dans le mercure, dans la glace, dans des dissolutions de différentes substances, ou même dans les mélanges réfrigérans: ces divers

modes de refroidissement paraissent avoir de l'influence sur les propriétés mécaniques des ressorts, des tranchans ou des pointes, mais ils ne paraissent pas modifier sensiblement les propriétés magnétiques de l'acier.

Pour *recuire* l'acier trempé, on le chauffe uniformément sur un lit de charbon pulvérisé, ou simplement concassé en fragmens plus ou moins gros, suivant le recuit que l'on veut obtenir. La grande difficulté est de mesurer alors les divers degrés de chaleur; mais l'acier jouit d'une propriété remarquable, qui permet d'évaluer avec assez d'approximation la température qu'il éprouve. Lorsqu'on le chauffe de la sorte, sa surface prend de vives couleurs qui se succèdent assez lentement, à mesure que la chaleur augmente : d'abord, au brillant éclat du métal succède une nuance de jaune clair ou *jaune paille*; à une température un peu plus haute cette nuance tourne à l'*orangé*, puis à l'*orangé foncé*, ensuite au *rouge violet*, puis au *bleu vif*, puis à une couleur verdâtre, très-éclatante, que l'on appelle *couleur d'eau*. Ces nuances, parfaitement distinctes, correspondent à des températures qui ne sont pas évaluées en degrés centigrades, mais qui sont telles, sans doute, qu'il existe plus de deux ou trois cents degrés de différence entre le jaune paille et la couleur d'eau. La première de ces nuances paraît répondre à peu près à 200°, et la seconde à environ 450° : ensuite, on peut pousser le recuit jusqu'au *rouge sombre*, au *rouge*, au *rouge cerise*, au *rouge cerise clair*, et au *rouge blanc* qui fait disparaître toute espèce de trempe, quand au sortir de cette température l'acier se refroidit librement dans l'air.

Pour déterminer maintenant l'influence de la trempe, on prend une lame d'acier, on la trempe au rouge blanc, on l'aimante à saturation, et l'on observe ensuite le temps qu'elle met à faire 100 oscillations; puis on la recuit successivement jusqu'au jaune paille, à l'orangé foncé, au bleu et à la couleur d'eau, etc., en la retirant après chaque

degré de recuit, pour l'aimanter à saturation, et lui faire faire 100 oscillations dont on observe la durée. Il est évident que les diverses intensités magnétiques de cette lame seront entre elles en raison inverse des carrés des temps observés. C'est ainsi que l'on arrive à constater par l'expérience, 1° que les lames qui ont reçu la trempe la plus dure sont douées de la plus grande force coercitive, et prennent par conséquent la plus grande intensité magnétique, lorsqu'on les aimante avec des barreaux assez puissans. 2° Que les lames recuites au bleu des ressorts, ou même à la couleur d'eau, conservent assez de force coercitive pour prendre une grande intensité magnétique. Or, l'acier trempé dur étant cassant comme du verre, il y a toujours de l'avantage à recuire les aiguilles jusqu'au bleu, puisqu'on ne perd que peu de chose en intensité magnétique, et que l'on évite ainsi tous les accidens qui pourraient provenir d'une rupture, ou de quelques changemens de forme.

Il faut cependant remarquer que l'acier ne se comporte pas toujours comme nous venons de le dire; quelquefois il prend inévitablement des points conséquens lorsqu'il est trempé dur, d'autres fois il ne prend le maximum d'intensité magnétique qu'après avoir été recuit jusqu'au rouge sombre, ou même jusqu'au rouge.

320. *Influence de la chaleur sur le magnétisme.* — Nous avons déjà dit qu'un aimant artificiel ou naturel, chauffé jusqu'au rouge blanc, perd complètement son magnétisme, de telle sorte qu'il n'est plus, après le refroidissement, qu'un corps interne, sans force directrice et sans force magnétique; cette observation est fort ancienne, elle avait été faite par Gilbert. Mais en perdant ainsi leurs fluides libres, ces corps ne perdent pas la propriété de redevenir magnétiques, lorsqu'on les aimante de nouveau par les procédés que nous avons fait connaître; seulement leur force coercitive est changée: celle des aimans naturels est diminuée sans qu'on puisse la reproduire, et celle des aimans artifi-

ciels est détruite jusqu'à ce qu'elle ait été rétablie par une nouvelle trempe. Cette recomposition du magnétisme, par l'influence de la chaleur, ne se fait pas subitement à la température rouge: elle se fait graduellement à mesure que la température s'élève. Pour s'en assurer on prend un barreau aimanté, dont on observe la force, en comptant la durée d'un certain nombre d'oscillations; puis on le porte succesivement à divers degrés de chaleur, et à chaque fois on le laisse refroidir, pour observer de nouveau son intensité magnétique; toutes ces intensités forment une série décroissante, depuis le point de départ jusqu'à la plus haute température à laquelle on arrive. M. Kupffer, qui a fait des observations très-exactes sur ce sujet, explique d'une manière satisfaisante tous les résultats qu'il a obtenus, en supposant que chaque degré d'élévation de température augmente de la même quantité la durée d'un même nombre d'oscillations. Par exemple, de 0 à 30° R., chaque degré de température augmente d'une demi-seconde la durée de 300 oscillations d'une aiguille qui fait, à 10°, 300 oscillations en 784″,5. Mais les expériences ne comprennent pas encore, jusqu'à présent, une assez grande étendue de l'échelle thermométrique, pour qu'on puisse appliquer cette loi avec une entière confiance.

M. Kupffer a aussi remarqué qu'il faut un temps très-long, pour qu'une température donnée achève sur un barreau toute la recomposition qu'elle est capable de produire. Par exemple, une aiguille qui a été plongée à plusieurs reprises dans l'eau bouillante, où elle restait 10′ à chaque fois, n'a perdu qu'à la sixième immersion tout le magnétisme qu'elle pouvait perdre. D'abord elle ne mettait que 578″ à faire 200 oscillations; après la 1re immersion elle mettait 637″,5; après la 2e, 642; après la 3e, 645; après la 4e, 647; après la 5e, 650,5; après la 6e, 652, et aussi 652 après la 7e.

Voici un autre effet de la chaleur, auquel on n'a pas fait

assez d'attention : à la température du rouge cerise, les aimans, l'acier et le fer perdent non-seulement le magnétisme libre qu'ils peuvent posséder, mais de plus ils deviennent incapables d'en recevoir la moindre trace; pendant tout le temps qu'ils sont soumis à cette température, ils paraissent comme du bois ou de la pierre, tout-à-fait insensibles à l'action décomposante des plus forts barreaux. Ainsi les aimans, l'acier et le fer ont une *limite magnétique*, et cette limite se trouve à peu près vers la température du rouge cerise.

Quelques analogies assez remarquables entre les distances des atomes des corps et leurs propriétés magnétiques, m'avaient conduit à penser que la limite magnétique des différens corps devait se trouver à des températures très-différentes, et j'ai, en effet, démontré par l'expérience : 1° que le cobalt ne cesse jamais d'être magnétique, ou plutôt que sa limite magnétique est à une température plus haute que le rouge blanc le plus éclatant; 2° que le chrôme a sa limite magnétique au peu au dessous de la température rouge sombre; 3° que le nickel a sa limite magnétique vers 350°, à peu près à la température de la fusion du zinc; 4° enfin, que le manganèse a sa limite magnétique à la température de 20 à 25° au dessous de 0°.

Les expériences sur les cinq corps simples magnétiques, le manganèse, le nickel, le chrôme, le fer et le cobalt, semblent prouver 1° que la chaleur n'agit sur le magnétisme que par la distance plus ou moins grande qu'elle détermine entre les atomes des corps; 2° que toutes les substances deviendraient magnétiques si l'on pouvait, par une action quelconque, rapprocher leurs atomes à une distance convenable.

Voilà à peu près tout ce que nous connaissons jusqu'à présent des influences de la chaleur sur les fluides magnétiques; il faut espérer qu'un si beau et si vaste sujet de recherches ne sera pas long-temps négligé, et que bientôt on

en pourra faire sortir quelque découverte fondamentale.

321. *Des causes qui peuvent aimanter les substances magnétiques.* — Nous venons de voir que la chaleur est une cause très-efficace pour déterminer la recomposition du magnétisme libre, mais elle est tout-à-fait impuissante pour déterminer la séparation des fluides; du moins il a été impossible jusqu'à ce jour d'obtenir par la chaleur la moindre trace d'aimantation, même dans les corps où l'équilibre magnétique est le plus facile à rompre. Ainsi, le magnétisme et la chaleur sont des agens naturels qui paraissent n'avoir aucune prise directe l'un sur l'autre.

La lumière ne paraît pas plus efficace que la chaleur pour déterminer une séparation des fluides magnétiques. Il est vrai que quelques observateurs, et particulièrement M. Morichini, ont cru reconnaître un pouvoir magnétisant dans les rayons solaires; mais j'ai apporté beaucoup de soins à répéter ces expériences sans découvrir aucune action sensible; MM. Reiss et Moser n'ont pas été plus heureux. (*Ann. de chim. et de phys.*, T. XLII, pag. 304.)

Il n'en est pas de même de l'électricité; elle agit sur le magnétisme avec une puissance remarquable. C'est la découverte de cette action qui a fait naître l'*électro-magnétisme*, branche nouvelle de la science que nous devons étudier dans l'un des livres suivans, et qui a reçu en peu d'années d'immenses développemens.

322. *Des aimans artificiels et naturels.* — Nous avons déjà dit qu'on appelle en général aimans naturels, les substances qui sont aimantées au sortir du sein de la terre, et aimans artificiels toutes les substances dans lesquelles nous parvenons, par nos procédés, à fixer du magnétisme. Un aimant naturel, chauffé au rouge, et réaimanté après cette opération, serait un véritable aimant artificiel. En donnant les procédés d'aimantation (316 et 317) et les moyens de changer et d'augmenter la force coercitive, nous avons donc donné les méthodes d'après lesquelles les aimans doi-

vent être composés; nous n'avons plus à présent qu'à faire connaître comment on peut les conserver, et comment on peut les assembler pour augmenter leur puissance.

Les aiguilles, les lames et les barreaux de toute espèce sont des aimans d'une seule pièce, qui, étant une fois aimantés à saturation, conservent très-bien leur magnétisme; cependant les lames et les barreaux pouvant être disposés de différentes manières à l'égard de la force terrestre, cette force peut, dans des circonstances favorables, déterminer une recomposition partielle des fluides. Par exemple, dans nos climats, un barreau qui serait tenu verticalement, son pôle boréal en bas, éprouverait une diminution magnétique; et si dans cette position il recevait quelques chocs ou quelques coups de marteau, il pourrait en peu de temps être réduit à une force très-faible, ou même prendre des pôles contraires. C'est pour empêcher ces recompositions que l'on emploie *les armatures*. On appelle en général *armures* ou *armatures* des pièces de fer doux, qui sont mises en contact avec les aimans pour maintenir leur activité, par la décomposition magnétique qu'elles éprouvent. Pour armer des barreaux, on les dispose parallèlement dans leurs boîtes, de manière que les pôles contraires se correspondent, et aux deux extrémités on ajoute transversalement deux prismes quadrangulaires de fer doux, qui complètent le parallélogramme. Chacune de ces pièces de fer devient ainsi un aimant qui réagit sur les barreaux pour y fixer les fluides décomposés.

Les aiguilles qui sont en activité ne peuvent point recevoir d'armature; mais elles n'en ont pas besoin puisqu'elles se tournent sans cesse pour obéir à la force qui les sollicite; c'est cette force elle-même qui leur sert d'armature.

Les *faisceaux magnétiques* sont des assemblages de plusieurs lames, dont les armatures exigent beaucoup plus de soin. La *figure* 40 représente un faisceau construit d'après les méthodes de Coulomb : il se compose de 15

lames rectangulaires, disposées en 3 couches de chacune 5 lames. Les lames de la couche supérieure et celles de la couche inférieure sont plus courtes de 2 pouces et demi ou 3 pouces, que celles de la couche moyenne; ce qui donne à chaque extrémité un retrait de 15 ou 18 lignes. Toutes ces lames, qui sont du reste pareilles dans leurs dimensions, s'ajustent dans les pièces de fer *f*, qui servent d'armature; un lien en cuivre *cc'*, les retient à chaque bout et les presse de manière que le système entier soit parfaitement immobile. Ces grands faisceaux sont destinés à être fixes lorsqu'on s'en sert pour aimanter; on construit, sur les mêmes principes, des faisceaux glissans qui ont une moindre longueur et qui ne se composent que de 6 ou 9 lames.

La *figure* 32 représente un aimant en *fer à cheval*; c'est un assemblage de plusieurs lames, qui sont immédiatement superposées. Après les avoir trempées, on les recuit, et on les dresse de manière qu'elles puissent s'appliquer exactement l'une sur l'autre; deux vis v et v', en fer ou en cuivre, les retiennent dans cette position. Ces lames sont aimantées séparément avant d'être assemblées; pour cela on les met en prise, aux deux bouts, avec les pôles contraires de deux puissans barreaux, et en partant du milieu ou du sommet de la courbure, on fait, par la méthode de la double touche, autant de frictions qu'il est nécessaire. Un anneau *nn'* sert à suspendre l'aimant, et une pièce de fer doux *pp'*, qu'on appelle *le portant* ou *le contact*, reste toujours en prise avec les deux pôles contraires A et B. Le portant n'a en général que le tiers de l'épaisseur de l'aimant, et il est légèrement arrondi sur sa surface de contact, de telle sorte qu'il ne touche l'aimant que par une seule ligne. Les aimans bien faits peuvent soutenir, au moyen du portant, jusqu'à 10 ou 20 fois leur poids.

Les armatures des aimans naturels sont représentées dans les *figures* 30 et 31. Les parties L, L' sont les *ailes* de l'ar-

mature, et les parties P, P′ en sont les *pieds*. On donne aux ailes une largeur égale à celle de l'aimant, et une épaisseur d'environ une ligne; les dimensions des pieds dépendent de la force de l'aimant, et ce n'est que par des essais successifs que l'on peut arriver à la forme et à la grandeur la plus convenable. La *figure* 39 représente une projection horizontale de l'aimant armé; on y voit le lien de cuivre *cc′*, qui presse les armatures sur les extrémités polaires de l'aimant.

On a observé sur les aimans naturels un phénomène dont il n'existe aucune explication plausible : c'est la *faiblesse* qu'ils éprouvent lorsqu'on *les surcharge*. Supposons qu'un aimant puisse porter 20 kilogrammes assez facilement, si on le charge de ces 20 kilogrammes, et que chaque jour on y ajoute un petit poids, on pourra graduellement augmenter la charge, au point de la porter à 30, ou peut-être à 40 kilogrammes. Mais dès que le contact se détache, entraîné par l'excès du poids, il est impossible de le faire reprendre : l'aimant ne veut plus *mordre*, et il faut revenir à une charge moindre que les 20 kilogrammes du point de départ, pour que l'aimant la puisse porter; cependant avec des précautions et du temps on parviendra à le *nourrir* de nouveau, et à lui rendre sa première vigueur.

Lorsqu'au lieu d'aimanter des aiguilles ou des prismes, on aimante des lames très-larges et peu épaisses, il est facile d'y varier la distribution magnétique d'une infinité de manières, et prenant, par exemple, des plaques de tôle d'acier de 8 ou 10 pouces carrés et de 1 ligne ou $\frac{1}{2}$ ligne d'épaisseur, et en traçant sur leur surface avec un aimant assez fort, des figures quelconques, on peut rendre ces figures apparentes en répandant de la fine limaille de fer avec un tamis, sur la face aimantée de la plaque (*Fig.* 46). M. de Haldat vient de publier un mémoire intéressant sur ce sujet. (*Ann. de Phys. et de Chim.*, t. XLII, pag. 33.) Les figures deviennent plus saillantes sur les plaques étamées,

et pour les faire disparaître il suffit de chauffer jusqu'à la fusion de l'étain.

323. *Historique des divers procédés d'aimantation.* — Pendant long-temps on a aimanté les aiguilles de boussole en les passant dans toute leur longueur sur le pied d'un aimant naturel (*Fig.* 41). En 1745, Knight fit connaître un procédé plus efficace et plus conforme à la théorie; Knight mettait des barreaux bout à bout dans la même ligne, et se touchant par le pôle contraire : l'aiguille à aimanter reposait sur ces barreaux, moitié sur l'un, moitié sur l'autre, et en les retirant elle était frottée par chacun d'eux dans la moitié de sa longueur.

Le même physicien eut aussi l'heureuse idée de réunir plusieurs aiguilles aimantées de cette manière, pour en former des faisceaux puissans. Un peu plus tard, Antheaume et Duhamel firent de nombreux essais pour découvrir la méthode de Knight, ou pour en inventer une meilleure, et c'est à ces physiciens que nous devons le procédé de la *touche séparée;* seulement ils se contentaient de mettre des prismes en fer, au lieu des barreaux fixes que nous employons maintenant. A peu près à la même époque, Mitchell et Canton inventaient en Angleterre la méthode de la *double touche;* mais l'influence des barreaux fixes avait aussi échappé à leur sagacité : ce fut Æpinus qui en montra l'avantage en 1758; et Coulomb qui les employa le premier, avec la méthode de Duhamel, en 1789.

CHAPITRE V.

Du Magnétisme en mouvement, et de quelques phénomènes singuliers d'attraction et de répulsion.

324. *De la force magnétique des disques tournans.* — C'est à M. Arago que nous devons la découverte de cette nouvelle force magnétique : il avait remarqué que la présence du cuivre diminue rapidement l'amplitude des oscillations d'une aiguille aimantée, sans en changer sensiblement la durée; et ce phénomène est devenu entre ses mains une source féconde en résultats. Le cuivre *en repos* exerce une action sur l'aiguille *en mouvement;* M. Arago a supposé d'abord, que le cuivre en mouvement devait agir à son tour, avec plus ou moins d'énergie, sur l'aiguille en repos, et il a été conduit de la sorte à des phénomènes d'une telle intensité, qu'il lui a été facile de les varier de mille manières, et d'en poser les lois fondamentales.

L'appareil qu'il a employé dans ses recherches est représenté dans les *figures* 49, 50 et 51. n (*Fig.* 49) est une horloge tout en cuivre, excepté deux ou trois petits pivots qui sont en acier; elle est portée sur un trépied en bois, très-solide, qui peut être mis d'aplomb au moyen de trois vis calantes. Cette horloge est destinée à imprimer un mouvement de rotation très-rapide à un axe vertical x (*Fig.* 51); l'axe communique le mouvement à une pièce tt' à trois branches, qui est représentée plus en grand dans la *figure* 50; c'est sur cette pièce que l'on ajuste les disques qui doivent servir aux expériences; ils se centrent d'eux-mêmes, au

moyen d'un petit trou qui reçoit le prolongement de l'axe de rotation, et ils sont arrêtés à leur contour, sur les branches de la pièce tt', par une petite pièce mobile que serre une vis de pression. On peut mettre à volonté trois volans v qui s'inclinent plus ou moins, suivant le degré de vitesse auquel on veut s'arrêter. Reste à présent à soumettre l'aiguille à l'influence du disque tournant. Pour cela on place autour de l'horloge une table à quatre pieds TT', qui porte un plateau pp', percé en son centre d'une ouverture un peu plus grande que les disques. A la partie inférieure de ce plateau, on colle une feuille de papier ll' (*Fig.* 51), et sur sa face supérieure on pose une cloche c, dans laquelle on suspend l'aiguille gg', ou moyen d'un fil de soie f. L'aiguille peut être élevée ou abaissée en tournant le treuil t dans un sens ou dans l'autre.

Le poids de plomb p met l'horloge en mouvement; un bouton sert à l'arrêter, et un compteur indique le nombre des tours, qui peut être de 8 à 10 par seconde; il y a même un timbre qui sonne à chaque centaine, et, par là, on peut aisément reconnaître l'instant où la vitesse de rotation est devenue à peu près uniforme. Cet appareil a été exécuté avec beaucoup d'intelligence et de précision par M. Perrelet, l'un de nos plus habiles horlogers.

Voici maintenant les phénomènes que l'on observe: tout étant en repos, et l'aiguille dirigée dans le méridien magnétique, on tourne le bouton d'arrêt, et le disque entre en mouvement; sa vitesse de rotation est d'abord très-petite, mais elle prend une accélération rapide, et bientôt l'aiguille est déviée comme si elle tendait à suivre le disque dans ses révolutions successives. Cependant cette force d'entraînement est balancée en partie par la force magnétique de la terre, qui rappelle l'aiguille dans le méridien; de telle sorte que le rapport de ces forces détermine la position d'équilibre. La force entraînante du disque croît avec sa vitesse de rotation : par conséquent, pour une faible vi-

tesse, l'aiguille s'arrête, par exemple, à 10° de déviation; pour une vitesse plus grande à 20°; et l'on peut ainsi, en modifiant les vitesses et en les soutenant uniformes, arrêter l'aiguille dans toutes les positions obliques à l'égard du méridien, depuis 0 jusqu'à 90°. Mais dès que la vitessse est assez grande pour entraîner l'aiguille au delà de cette déviation de 90°, il n'y a plus de point de repos: l'aiguille tourne avec le disque, et tend à prendre elle-même toute la vitesse de rotation dont il est animé. Telle est la force magnétique toujours croissante que prennent les corps en mouvement. Essayons de voir comment cette force varie en intensité, par rapport à la distance, et comment elle se dirige par rapport à la surface du disque.

1°. Cette force décroît à mesure que la distance augmente; car l'aiguille, qui tourne d'un mouvement *continu* lorsqu'elle n'est séparée du disque que par l'épaisseur de la feuille de papier qui ferme la cloche, n'éprouve plus, lorsqu'on la soulève graduellement, que des *déviations déterminées*, diminuant toujours à mesure que la distance devient plus grande. Il est bien entendu que la vitesse de rotation du disque reste la même dans toutes ces épreuves comparatives.

2°. La force que nous observons dans les expériences précédentes est évidemment *perpendiculaire aux rayons du disque, et parallèle à sa surface.* Il importe d'examiner si elle est la seule force qui résulte du mouvement; pour cela, M. Arago a fait l'expérience suivante : une aiguille aimantée est suspendue verticalement par un fil, à l'extrémité du fléau d'une balance, et équilibrée de l'autre côté par des poids quelconques; sous l'extrémité inférieure de cette aiguille, on fait tourner un disque de cuivre, et l'on observe une répulsion : donc il résulte aussi du mouvement *une force répulsive, perpendiculaire à la surface du disque.* Cette même expérience se peut faire avec une aiguille d'inclinaison, rendue horizontale par un contre-

poids, et dont une extrémité seulement est approchée au dessus du disque tournant.

3°. Enfin il y a une troisième force, agissant *dans le sens des rayons du disque*, et parallèlement à sa surface. Pour le faire voir, M. Arago dispose une aiguille d'inclinaison, de manière qu'elle soit verticale, et que son plan de rotation passe par le centre du disque; alors, en la déplaçant sur un même rayon, la pointe de l'aiguille peut correspondre à tous les points de ce rayon ou de son prolongement. Or, quand la pointe de l'aiguille tombe au dehors du disque, elle est repoussée loin du centre de rotation; cette force répulsive diminue à mesure qu'on avance l'aiguille vers le centre; elle est nulle à une certaine distance, et se change ensuite en force attractive, pour redevenir nulle au centre lui-même.

Ainsi, sur chaque rayon du disque il y a un point entre la circonférence et le centre, où la force dont il s'agit est nulle; au delà elle est répulsive, et plus près du centre elle est attractive. C'est ce qui est indiqué dans la *figure* 52, où les lignes ponctuées marquent les directions primitives de l'aiguille.

Après avoir reconnu l'existence de ces trois forces, M. Arago a cherché leurs rapports d'intensité, et il arrive à cette conséquence remarquable, que ces rapports changent avec la vitesse de rotation.

Toutes les substances ne prennent pas, par le mouvement, la même énergie magnétique : les métaux sont à cet égard doués d'une puissance beaucoup plus grande que les autres corps, et plusieurs physiciens, en répétant ces expériences, n'ont pas obtenu d'effet sensible avec le verre, le bois, l'eau, etc.

MM. Herschell et Babbage, dans un très-beau travail sur ce sujet, établissent l'ordre suivant, pour l'action de différens métaux. Celle du cuivre est prise pour unité.

Cuivre.	1	Zinc.	0,93

Etain.	0,46	Antimoine.	0,09
Plomb.	0,25	Bismuth.	0,02

L'argent paraît doué d'une grande force, l'or d'une très-faible; le mercure se place entre l'antimoine et le bismuth.

Lorsqu'un disque offre des solutions de continuité ou des fentes dans le sens de ses rayons, il perd une grande partie de sa force; et l'on doit aussi à MM. Herschell et Babbage cette remarque curieuse, qu'en ressoudant les bords avec un métal quelconque, même avec du bismuth, quand le disque est de cuivre, on lui rend presque la totalité de la force qu'il avait perdue. Mais en remplissant seulement ces intervalles avec des poudres métalliques bien pressées, ou avec des liquides tels que l'eau ou l'acide sulfurique, on ne parvient pas à réparer sensiblement ses pertes d'intensité.

Enfin MM. Herschell et Babbage ont encore constaté les deux faits suivans : 1° que les écrans de substances non-magnétiques (c'est-à-dire non-magnétiques à la manière du fer ou de l'acier) n'exercent aucune influence lorsqu'on les place entre l'aiguille aimantée et les disques tournans; 2° qu'un disque en mouvement n'a aucune puissance pour entraîner un disque en repos; ce qui prouve que ce n'est pas le mouvement lui-même qui décompose les fluides magnétiques, et qu'il n'agit que pour agrandir les effets des fluides préalablement décomposés.

M. Barlow a constaté que le fer en mouvement agit à la manière des autres métaux, mais avec beaucoup plus d'énergie; nous regrettons que les phénomènes qu'il a observés soient trop compliqués pour qu'il nous soit possible de donner ici l'extrait du mémoire qu'il a publié sur ce sujet. (*Philosophical Transactions*, 1825.)

M. Poisson a donné une théorie du magnétisme en mouvement, dont nous ne pouvons indiquer que les principes (*Ann. de Phys. et de Chim.*, t. XXXII, p. 225). Il sup-

pose que dans chaque *élément magnétique* il y a, outre la *force coercitive*, une autre force analogue à la résistance des milieux, qui *retarde* le mouvement des molécules de fluide austral et de fluide boréal. Cette *résistance* est indépendante de la force coercitive; elle peut varier avec la nature des substances, avec leur température, ou avec l'arrangement de leurs molécules; ses effets sont insensibles lorsque les corps sont sollicités par une force magnétique qui reste la même en grandeur et en direction, parce que, avec le temps, les fluides peuvent se déplacer et venir à la surface des élémens, s'arranger suivant les lois de l'équilibre. Mais quand la force magnétique change rapidement, la résistance qu'ils éprouvent détermine un tout autre arrangement, et alors ils peuvent être dispersés suivant des lois très-variables, dans *toute l'étendue* de l'élément magnétique, et par conséquent produire *au dehors* des effets complètement différens par leur intensité. Cette hypothèse, à laquelle M. Poisson est arrivé par des vues profondes et tout-à-fait neuves sur la théorie du magnétisme, ne rend pas raison des phénomènes d'une manière vague et incertaine: transformée en calcul et réduite en formules, elle reproduit tous les résultats de l'expérience; elle les analyse et les enchaîne d'une manière surprenante, et même elle a conduit M. Poisson à prédire des phénomènes qui, depuis, ont été confirmés par l'expérience.

325. Les effets magnétiques des disques tournans sont liés aux modifications qu'éprouve l'aiguille aimantée lorsqu'elle oscille en présence des différens corps. M. Poisson retrouve cette liaison dans ses formules, ou plutôt il l'établit d'une manière précise. Voilà donc deux ordres de phénomènes, et deux carrières nouvelles qui nous ont été ouvertes par les deux expériences fondamentales de M. Arago. L'action des différens corps sur l'amplitude des oscillations de l'aiguille aimantée a été étudiée par MM. Arago, Nobili et Bacelli, Seebeck et Baumgaertner

(*voyez* le *Bulletin des Sciences*, de M. de Férussac, septembre 1826, août 1826, août 1827 et octobre 1827). Nous nous contenterons de rapporter ici les résultats de M. Seebeck, comme étant les plus complets et les mieux constatés. M. Seebeck a fait osciller une aiguille de 2 pouces et $\frac{1}{8}$ de longueur, à 3 lignes de distance de différentes plaques métalliques, et il a observé le nombre des oscillations qui devaient se faire pour que l'amplitude fût réduite de 45° à 10°. Voici, dans ces circonstances, le nombre des oscillations, l'épaisseur des plaques, et la nature de leur substance :

Nombre des oscill.	Epaisseur des plaques.	Substances.
116	» lig.	Marbre.
112	2,0	Mercure.
106	2,0	Bismuth.
94	0,4	Platine.
90	2,0	Antimoine.
89	0,75	Plomb.
89	0,2	Or.
71	0,5	Zinc.
68	1,0	Etain.
62	2,0	Laiton.
62	0,3	Cuivre.
55	0,3	Argent.
6	0,4	Fer.

Il paraît aussi, d'après M. Seebeck, qu'en alliant les substances magnétiques à d'autres qui ne le sont pas, on peut former des composés qui n'exercent aucune action sur l'aiguille aimantée. Tels seraient par exemple, l'alliage de 1 partie de fer et 4 d'antimoine, et celui de 1 partie de nickel avec 2 parties de cuivre.

326. Coulomb avait fait connaître à l'Institut, en 1812, une série de phénomènes qui probablement ne sont pas sans liaison avec les phénomènes précédens. Sous une

cloche en verre (*Fig.* 55), il suspendait par un fil de cocon de petites aiguilles très-fines, de 6 à 8 millimètres de longueur, et composées de substances quelconques, organiques ou inorganiques; deux forts barreaux étaient disposés pour s'avancer, par leurs pôles contraires A et B, jusqu'à une petite distance des extrémités de l'aiguille suspendue, et dès qu'ils arrivaient assez près, l'aiguille sentait leur influence, car elle se dirigeait dans la ligne des pôles, et se mettait ensuite à faire des oscillations plus ou moins rapides. Des barres non aimantées ne produisent point cet effet; donc il y a, dans ces circonstances, une action magnétique sur tous les corps de la nature, car il n'en est pas un seul qui ne se dirige et ne fasse des oscillations. Reste à savoir maintenant si tous les corps contiennent du fer, du cobalt, du chrôme ou du nickel, et si quelques atomes de ces substances, tout-à-fait imperceptibles par les analyses chimiques, ne seraient pas capables de leur donner cette propriété attractive. Pour s'en assurer, Coulomb fit des mélanges artificiels, et des alliages de fer en très-petites proportions; et comparant leurs effets par ces méthodes ingénieuses et précises qui lui étaient si familières, il fut conduit à cette conséquence, que, si les substances magnétiques étaient la vraie cause de ces phénomènes, elles devaient du moins être en si faibles proportions que l'analyse chimique serait tout-à-fait impuissante pour les découvrir.

327. M. Lebaillif a eu dernièrement l'ingénieuse idée de composer, avec de petites aiguilles magnétiques, un système très-délicat et très-sensible, avec lequel il a découvert des forces dont on était loin de soupçonner l'existence. Son appareil, qu'il appelle *sidéroscope*, est représenté dans la *Figure* 53; il se compose d'un brin de paille de 12 à 15 pouces de longueur, dans lequel on ajuste trois fines aiguilles à coudre, aimantées à saturation : l'une, $a\,b$, est simplement glissée dans le tuyau, et les deux autres, $a'\,b'$ et $a''\,b''$, sont plantées au travers de la paille, de

manière que leurs pôles contraires se correspondent : ce système est porté par un petit étrier de papier, qui s'attache à un fil de cocon. La portion $m\ h$ est la plus longue, et c'est au-dessous de son extrémité que l'on place sur le fond de la cage un arc $r\ r'$, divisé en degrés et demi-degrés; la portion $m\ c$ n'a point de force directrice, puisque l'action de la terre se détruit d'elle-même sur les deux aiguilles opposées, $a'\ b'$ et $a''\ b''$; en sorte que l'on pourrait, à la rigueur, supprimer ces aiguilles. Mais la portion $m\ h$ a une force directrice dépendante de l'aimantation de l'aiguille $b\ a$, de sa longueur et de sa distance au point de suspension. Une petite porte à coulisse $t\ p$, percée d'une ouverture t, complète la fermeture de l'appareil; quand on veut faire une expérience, on la fait glisser pour amener l'ouverture vis-à-vis l'extrémité de l'aiguille. Presque tous les corps que M. Lebaillif a présentés au sidéroscope, exercent quelque action sur l'aiguille. La plupart de ces actions peuvent sans doute être attribuées à quelques atomes de fer : cependant il ne faudrait pas conclure que, dans ces phénomènes, la force magnétique est la seule qui soit en jeu; car M. Lebaillif a annoncé ce fait qui serait nouveau et important, que le bismuth et l'antimoine exercent *toujours* une force répulsive.

FIN DU MAGNÉTISME.

LIVRE QUATRIÈME.

DE L'ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE PREMIER.

Des Actions électriques.

329. *Il y a des substances qui prennent, par le frottement, la propriété d'attirer les corps légers.* Il est facile de s'assurer que les diverses substances, prises dans leur état naturel, n'ont aucunement la propriété d'attirer les petits fragmens de feuilles d'or ou de clinquant, ni la sciure de bois ou de moelle de sureau, ni les barbes de plume, ni d'autres corps légers, quels qu'ils soient; mais lorsque, avec une étoffe de laine ou de soie, on frotte un tube de verre, un bâton de soufre ou de résine, un morceau d'ambre ou de succin, ces différens corps prennent à l'instant une propriété très-remarquable : ils attirent à eux tous les corps légers qu'on leur présente, et cette attraction est si forte, que les minces feuilles de métal, par exemple, sont enlevées à plus d'un pied de distance, et viennent se précipiter sur la surface du corps attirant. La cause de ce phénomène est ce que l'on appelle *l'electricité*, du mot grec ἤλεκτρον, qui signifie *ambre*, parce que la propriété dont il s'agit fut autrefois découverte dans cette substance par les philosophes grecs, dès le temps de Thalès, qui vivait 600 ans avant l'ère chrétienne.

Pour distinguer avec plus de certitude les corps qui deviennent électriques par le frottement, on emploie divers appareils que l'on appelle en général *électroscopes*, c'est-à-dire instrumens propres à découvrir l'électricité.

Le plus simple des électroscopes est le *pendule électrique*, qui se compose d'une petite balle de sureau, suspendue à l'extrémité d'un fil de soie, ou d'un fil de métal très-fin (*Fig.* 56). Lorsqu'on veut éprouver un corps, on l'approche de la balle, et s'il ne peut pas l'attirer à lui d'une quantité sensible, on est assuré qu'il n'a point d'électricité, ou plutôt qu'il n'en peut avoir qu'une très-faible charge.

L'aiguille électrique (*Fig.* 57) est un autre électroscope un peu plus *sensible* que le pendule; elle se compose d'un petit fil de cuivre, terminé par deux boules, b et b', qui doivent être creuses pour être plus légères; au milieu de la longueur du fil est une chape en acier ou en agate, que l'on pose sur un pivot bien aiguisé. Le frottement de la chape sur le pivot étant la seule résistance à vaincre, on conçoit qu'il est possible de donner à l'aiguille une grande mobilité.

L'électroscope de Coulomb (*Fig.* 61) est l'appareil le plus sensible et le plus délicat, pour indiquer la présence des forces électriques. On le construit avec un fil de cocon f, une aiguille de gomme laque $g\,g'$, et un petit cercle de clinquant c. Le fil est fixé à l'extrémité supérieure s, du tube T; là, on peut l'enrouler ou le dérouler, au moyen du treuil t; on peut aussi lui donner de la torsion au moyen de la pièce mobile $d\,d'$; l'aiguille est suspendue par son centre de gravité : sa moitié $g'm$, plus grosse et plus courte, équilibre exactement sa moitié $g\,m$, chargée du poids léger du clinquant. Une cage en verre $v\,v'$ préserve l'aiguille des agitations de l'air; elle porte une circonférence divisée D D', et un couvercle $c\,c'$ percé d'une ouverture o : c'est par cette ouverture que l'on fait descendre lentement les corps électrisés qui doivent attirer l'extrémité de l'aiguille pour

la faire tourner, à moins toutefois qu'ils ne soient assez puissans pour agir du dehors à travers l'épaisseur du verre.

Au moyen de ces appareils, on peut facilement soumettre à l'épreuve tous les corps, et voir s'ils sont tous capables de prendre de l'électricité par le frottement. L'expérience en est curieuse à faire, par l'extrême variété des résultats qu'elle donne : on trouve en effet que la gomme laque et la résine, l'ambre, le soufre et le verre, sont des corps éminemment électriques; qu'il en est de même du diamant, de la topaze, de l'émeraude et de la plupart des pierres précieuses; que la terre cuite, le bois et le charbon donnent rarement des signes d'attraction, même quand ils ont été frottés long-temps et à plusieurs reprises; enfin, que les métaux, et d'autres corps encore, ne prennent jamais la moindre apparence de propriété attractive, quelque soin qu'on apporte à répéter ou à varier les frictions. Voilà donc tous les corps de la nature séparés en deux grandes classes, ceux qui prennent de l'électricité par le frottement, et qu'on appelle *idio-électriques*; et ceux qui n'en prennent pas, que l'on appelle *anélectriques*.

330. *Des corps conducteurs et des corps non conducteurs.* Si les corps anélectriques ne prennent pas d'électricité quand on les frotte, ils peuvent cependant en prendre d'une autre manière. C'est Gray, physicien anglais, qui fit cette découverte en 1727. Gray, après avoir électrisé un tube de verre, ouvert par les deux bouts, voulut voir s'il obtiendrait les mêmes résultats, en fermant le tube avec un bouchon de liége; car à cette époque la science était encore si peu avancée que l'on essayait de tout au hasard, on n'avait rien pour se conduire, pas même un système. Or, en faisant l'expérience, Gray s'aperçut avec un grand étonnement que le bouchon lui-même était devenu électrique, tandis qu'il ne l'est jamais lorsqu'on le frotte directement. Une tige de métal, plantée dans le bou-

chon, devient électrique comme lui ; une tige plus longue le devint pareillement, et l'habile observateur ne se lassait pas de répéter des expériences aussi curieuses. Voyant qu'il ne pouvait pas, dans son cabinet, ajuster au bouchon des tiges assez longues, il imagina de monter au premier étage et de suspendre à son tube électrique un fil de métal qui descendît jusqu'au sol ; il frottait le tube, et un de ses amis présentait des corps légers à l'extrémité du fil : chose surprenante ! les corps légers y sont vivement attirés. On répéta l'expérience au second et au troisième étage, et toujours avec le même succès. Donc le métal a la propriété de transmettre l'électricité ; et puisqu'il la transmet instantanément, il faut que l'électricité soit une espèce de *fluide*, qui passe du verre au métal, et qui se répande instantanément sur toute sa surface. Cette propriété se manifeste dans tous les corps anélectriques, et on l'exprime en disant que tous ces corps sont *conducteurs* de l'électricité. Au contraire, les corps idio-électriques sont *non conducteurs*, c'est-à-dire que l'électricité ne se répand jamais sur leurs surfaces ; car en frottant un tube de verre à l'une de ses extrémités seulement, son autre extrémité ne donne aucun signe d'attraction.

Cette vérité fondamentale peut être démontrée avec la *machine électrique*, que nous prendrons seulement comme moyen d'avoir de l'électricité : on fait communiquer avec elle un long fil de métal, soutenu par des fils de *soie* ou sur des tubes de *verre*, et dès qu'on tourne la machine, on reconnaît aisément, 1° qu'il est électrisé dans toute son étendue, quelle que soit sa longueur, et quelles que soient les circonvolutions qu'on lui fasse parcourir ; 2° que s'il est interrompu quelque part, par du verre ou de la soie, il ne montre plus d'électricité au delà de cette interruption ; 3° et que s'il touche *au sol*, il ne donne plus aucun signe électrique ; car le sol est assez bon conducteur pour que l'électricité s'y répande, se dissipe au large sur toute sa

surface, et de là se communique à l'édifice entier, ou même au globe de la terre.

Il résulte de là, que l'air est un corps non conducteur; car s'il était conducteur, comme un métal, l'électricité développée par le frottement passerait du corps frotté dans l'air qui l'environne, et se disperserait à l'instant dans toute la masse de l'atmosphère.

L'eau et la vapeur d'eau sont de bons conducteurs : un corps électrisé donne toute son électricité à l'eau dans laquelle on le plonge, ou à la vapeur d'eau bouillante à laquelle on l'expose. C'est pourquoi l'électricité, qui se conserve long-temps dans l'air sec, se dissipe promptement dans l'atmosphère, quand l'air est humide.

Le corps humain est aussi un bon conducteur : quand un homme est debout sur un mauvais conducteur, comme un gâteau de résine, il s'électrise dans toute son étendue, en touchant avec sa main des corps électrisés; et quand il repose sur le sol, il ne conserve rien de l'électricité qu'il prend aux corps; il la transmet au sol, où elle va se perdre. Cette propriété nous explique pourquoi les métaux ne s'électrisent point lorsqu'on les tient à la main nue, puisque leur électricité doit se dissiper à mesure qu'elle se développe.

Les plus mauvais conducteurs deviennent d'assez bons conducteurs, lorsqu'on les humecte de quelque vapeur aqueuse; c'est pourquoi il faut chauffer les corps pour les sécher avant de les soumettre au frottement; alors le moindre contact les électrise, et même la main sèche jouit de cette propriété : en passant, par exemple, un tube de verre, un ruban de soie ou une bande de papier entre les doigts, on leur donne une grande force électrique.

La *conductibilité électrique* des différens corps dépend donc d'une cause permanente, qui est la nature de leur substance; mais elle dépend aussi de plusieurs causes accidentelles dont il est difficile de mesurer l'influence. Ainsi,

au lieu de dire que les corps sont conducteurs ou non conducteurs, il est plus exact de dire qu'ils sont bons conducteurs ou mauvais conducteurs; car il n'existe pas un corps qui soit non conducteur absolu. Les plus mauvais conducteurs sont la gomme laque, la soie, le verre et les résines; on les appelle aussi corps *isolans*, parce que les corps électrisés qui reposent sur eux sont véritablement isolés ou séparés du sol, et conservent long-temps l'électricité qu'ils possèdent. Les métaux sont les meilleurs conducteurs que l'on connaisse; nous verrons qu'un fil de métal, de plusieurs lieues de longueur, s'électrise à l'instant dans toute son étendue, lorsqu'un peu d'électricité est développée ou déposée sur un seul de ses points. Entre les plus mauvais et les meilleurs conducteurs se trouve l'infinie variété des corps de la nature ayant tous des degrés de conductibilité différens.

331. *Des deux espèces d'électricité.* Un corps électrisé repousse un corps léger auquel il vient de communiquer de son électricité : en effet, prenons un *pendule isolé* (c'est le pendule de la figure 56, dont le support est en verre et dont le fil de suspension est en soie), dès que nous approchons un tube électrisé, la balle de sureau est fortement *attirée*; mais vient-elle toucher le tube et se coller à lui pendant quelques instans, aussitôt elle est *repoussée* et repoussée à distance, comme elle était attirée d'abord. Cette répulsion de la balle est produite par l'électricité qu'elle a prise au tube, car en la touchant avec la main pour la remettre à l'état naturel, elle est *attirée* de nouveau, et de nouveau *repoussée* dès qu'elle est venue au contact; et ce qui en est une preuve encore plus frappante, c'est qu'alors elle attire les corps naturels, ou plutôt elle est attirée par eux, parce qu'elle est plus mobile. Cette expérience peut être faite avec l'électroscope de Coulomb, ou avec *l'aiguille isolée* (on appelle ainsi l'aiguille de la *figure* 57, lorsqu'elle est posée sur une plaque de substance

non conductrice, ou bien lorsqu'elle est simplement portée sur son pivot, par une chape isolante; par exemple, une chape de verre ou d'agate). On peut aussi la varier d'une autre manière, avec une feuille d'or qui flotte dans l'air. Dans tous les cas, chaque corps électrique, quel qu'il soit, repousse toujours le corps léger qu'il vient de toucher.

Mais si l'on prend deux pendules isolés, l'un qui soit électrisé par le verre, et repoussé par lui, l'autre électrisé par la résine, et pareillement repoussé par elle, on observera ce phénomène remarquable : que le verre attire puissamment le pendule qui a été électrisé par la résine, *et vice versâ*, que la résine attire aussi très-vivement le pendule qui a été électrisé par le verre; on pourra même observer que les pendules s'attirent l'un l'autre, tandis que deux pendules touchés avec le même corps électrique se repoussent mutuellement (*Fig.* 58). Donc, l'électricité du verre et celle de la résine ne sont pas identiques, puisque chacune attire ce qui est repoussé par l'autre. Ces deux électricités, différentes dans leur origine et dans leurs effets, doivent porter aussi des noms différens : la première est appelée *électricité vitrée*, et la seconde *électricité résineuse*.

Ainsi nous sommes conduits à cette conséquence importante : qu'il y a deux électricités telles, que chacune se repousse et attire l'autre.

Sans avoir éprouvé les autres corps, nous pouvons être assurés d'avance que leur électricité est résineuse ou vitrée; car s'ils agissent sur un pendule électrisé, il faut bien qu'ils le repoussent ou qu'ils l'attirent. C'est, au reste, ce qu'il est facile de vérifier sur tous les corps. Cette belle découverte des deux électricités a été faite par Dufay, physicien français, en 1733. (*Mém. de l'Académie des Sciences*, 1733).

Quelques physiciens donnent à l'électricité vitrée le nom

d'*électricité positive*, et à l'électricité résineuse celui d'*électricité négative ;* il nous arrivera souvent d'employer ces dénominations, bien qu'elles tiennent à un système où l'on essaie d'expliquer tous les phénomènes par une seule électricité, qui serait tantôt *en excès* ou *en plus*, tantôt *en défaut* ou *en moins*.

332. *Des fluides électriques et de l'état naturel des corps.* — De la rapidité avec laquelle l'électricité se répand sur toute l'étendue des corps conducteurs, on conclut qu'elle est un fluide excessivement mobile ; et, de l'opposition qui existe entre les électricités du verre et de la résine, on conclut que ce fluide est double, c'est-à-dire qu'il y a deux fluides électriques, comme il y a deux fluides magnétiques. Ces deux fluides, *combinés* entre eux par leur attraction mutuelle, ou *neutralisés* l'un par l'autre, constituent *l'état naturel* des corps ; mais viennent-ils à être *décomposés* ou *séparés* par une cause quelconque, les actions contraires qu'ils exercent au dehors ne peuvent plus se compenser exactement, et le corps dans lequel cette *décomposition* a eu lieu est un corps électrisé ; il est *électrisé vitreusement* si c'est le fluide vitré qui domine, et *résineusement* si c'est le fluide résineux. Quant au mode d'existence du fluide électrique dans l'intérieur des corps, tous les phénomènes semblent indiquer qu'il est répandu dans les intervalles qui séparent les atomes, et que là il peut être, de proche en proche, décomposé et recomposé, suivant les forces qui le sollicitent. Il y a toutefois une différence fondamentale entre le fluide électrique et le fluide magnétique : celui-ci est enfermé dans les élémens magnétiques, il peut s'y mouvoir, mais il n'en peut sortir ; tandis que le fluide électrique est libre dans tous les corps ; il peut traverser dans tous les sens toute l'étendue de leur masse, et même il peut en sortir pour se répandre et s'accumuler sur les corps voisins. Cette vérité résulte évidemment de toutes les expériences que nous avons déjà rapportées, et

nous la verrons confirmée par l'ensemble des phénomènes électriques.

Lorsque nous développons de l'électricité résineuse ou vitrée, dans un corps qui était d'abord à l'état naturel, il faut donc que l'électricité contraire se trouve pareillement développée, ou bien qu'elle soit détruite par la cause décomposante. Or, la destruction d'un agent naturel ou d'une force n'étant pas moins impossible que la destruction de la matière elle-même, nous pouvons être assurés que jamais l'une des électricités n'est développée sans l'autre. C'est au reste ce que l'on peut vérifier par l'expérience, en frottant l'un contre l'autre deux disques isolés par des manches de verre (*Fig.* 59) : lorsque après le frottement on les tient unis, ils ne donnent aucun signe électrique ; mais dès qu'on les sépare, il est facile de reconnaître que l'un possède l'électricité vitrée, et l'autre la résineuse. Ces disques peuvent être en verre, en résine, en bois ou en métal, et si l'on veut donner plus de variété à l'expérience, on y colle des fourrures, des étoffes, du papier, etc. ; car l'espèce d'électricité ne dépend que des surfaces frottantes.

Un corps naturel possédant les deux électricités en égale proportion, il semble d'abord qu'il n'y ait pas de raison pour qu'il prenne ou qu'il conserve l'un des fluides de préférence à l'autre : aussi est-il susceptible de devenir par le frottement, tantôt résineux et tantôt vitré : par exemple ; le verre est vitré quand on le frotte avec la laine ou la soie, et il est résineux quand on le frotte avec une peau de chat, une peau de loutre, et plusieurs autres fourrures. Il y a pareillement des corps qui font prendre à la résine l'électricité vitrée, tandis que beaucoup d'autres lui font prendre la résineuse. Pour définir rigoureusement chacun des fluides, il convient donc d'ajouter que le fluide vitré est produit par le verre frotté avec la laine, et le résineux produit par la résine frottée avec la peau de chat, la laine ou la soie.

Concevons que l'on dresse une liste de tous les corps, en

les rangeant par ordre de *tendances électriques*, de telle sorte que chacun soit vitré avec les suivans, et résineux avec les précédens; alors on pourra reconnaître que des circonstances presque imperceptibles feront changer la place d'un corps dans cette liste : par exemple, une élévation de température le prédisposera à prendre l'électricité résineuse et le fera redescendre de plusieurs rangs, tandis que le refroidissement le fera remonter, en le rendant plus vitré ; une surface plus polie le fera pareillement remonter, tandis qu'une surface plus rugueuse le fera redescendre; c'est ce qu'il est facile de vérifier sur un tube de verre dépoli. La couleur, la disposition des molécules ou des fibres, le sens de la friction, et même la pression plus ou moins forte du corps frottant, pourront produire des résultats analogues; par exemple, un ruban de soie noire prend toujours l'électricité résineuse, quand on le frotte avec un ruban blanc, et des rubans de la même pièce étant frottés en croix, celui qui est immobile prend l'électricité vitrée et l'autre la résineuse. Il y a même des substances, comme le *disthène*, qui, sur certaines parties de leur surface, prennent l'électricité vitrée, et la résineuse sur d'autres, sans qu'on puisse y reconnaître la moindre différence de température ou d'aspect. On peut varier indéfiniment ces expériences, avec des rubans de laine ou de soie, des bandes de papier, des pièces de fourrure et des corps conducteurs, que l'on isole très-bien en les supportant par des tuyaux de plume.

334. *De la communication de l'électricité.* — L'électricité se communique au contact, et peut aussi se communiquer à distance ; mais dans tous les cas son mode de communication dépend de la conductibilité des corps et de l'étendue de leur surface.

Au contact, les corps très-mauvais conducteurs ne prennent ou ne perdent de l'électricité que dans l'étendue de leur contact; les très-bons conducteurs la prennent ou la

perdent dans toute l'étendue de leur surface, et les corps intermédiaires, pour leur conductibilé, présentent des résultats intermédiaires, et prennent ou perdent l'électricité autour des points de contact, dans une étendue d'autant plus grande qu'ils sont meilleurs conducteurs. Ainsi, des balles de verre, de soufre ou de résine, qui touchent des tubes de verre électrisés, des bâtons de résine ou des conducteurs métalliques, ne s'électrisent jamais que dans les points qu'elles ont de commun avec les corps électriques. Des morceaux de papier ou de carton, légèrement humectés, s'électrisent à une certaine distance autour du contact, et les corps métalliques isolés sont, après le contact, électrisés sur toute leur étendue; par conséquent leur électricité est d'autant moins sensible que leur surface est plus grande. S'ils communiquent au sol, leur surface est infinie, et l'électricité qu'ils prennent, tout-à-fait insensible: on dit alors que l'électricité s'est écoulée dans le sol ou dans le *réservoir commun*, parce qu'en effet elle s'est répandue sur tout le globe de la terre.

Quand le corps électrisé est lui-même conducteur, il importe peu qu'on le touche par un point ou par un autre: la perte qu'il éprouve se fait sentir sur toute sa surface, et pour le ramener à l'état naturel, il suffit de le mettre un instant en communication avec le sol, tandis que les mauvais conducteurs ne sont déchargés de leur électricité qu'après avoir été touchés dans tous leurs points.

L'électricité qui se communique *à distance* se répand sur les corps à raison de leur conductibilité, comme celle qui se commuinique au contact; mais à son passage elle présente le phénomène curieux de *l'étincelle électrique*. Il n'est pas nécessaire qu'un tube soit très-fortement électrisé pour qu'on voie, à la distance de plus d'un pouce, briller une vive étincelle quand on en approche une tige de métal ou même la jointure du doigt: en même temps on entend un bruit sec, qui semble jaillir avec l'étincelle; nous verrons

plus tard la cause du bruit et celle de la lumière. Quand le corps électrisé est métallique, et qu'il offre une grande surface, comme les conducteurs de la machine, l'étincelle part à plus d'un pied de distance; sa lumière prend un éclat éblouissant, et le bruit qui l'accompagne frappe l'air comme un coup de fouet. C'est Otto de Guericke, l'inventeur de la machine pneumatique, qui vit le premier l'étincelle électrique; et plus tard, Dufay, dont nous venons de parler, excita une grande admiration, en démontrant que du corps d'un homme on peut faire jaillir des étincelles et des lames de feu, comme des conducteurs de la machine. Pour en faire l'expérience, il faut monter sur un gâteau de résine bien sec, ou sur un isoloir ayant les pieds de verre, et communiquer avec la machine, soit médiatement en la touchant avec la main, soit immédiatement en la touchant avec un tige ou une chaîne de métal; la personne qui se trouve dans cette position ne reçoit aucun choc lorsqu'on tourne la machine pour développer de l'électricité; seulement elle éprouve sur la peau, et surtout à la figure, l'impression d'un souffle léger; ses cheveux se hérissent et laissent échapper des aigrettes de lumière; alors si on approche d'elle la jointure du doigt, ou quelque corps conducteur, on en tire de longues étincelles, et l'on éprouve soi-même une *commotion électrique* qui n'a rien de dangereux. Si l'étincelle ne part qu'à la distance d'un pouce, on ne sent qu'une légère piqûre; si elle part à deux ou trois pouces, la sensation se fait sentir jusqu'au coude, et tout l'avant-bras se fléchit d'un mouvement involontaire et irrésistible; l'étincelle qui part à une distance plus grande, comme à six ou huit pouces, se fait sentir jusqu'à la poitrine, et produit un ébranlement dans tout le corps : alors on est averti qu'il n'est pas prudent de pousser l'expérience plus loin. Pendant ce temps-là la personne isolée, qui communique à la machine, ressent à peu près les mêmes secousses que la personne qui l'approche pour en tirer des étincelles.

De ce qu'on n'est pas brûlé par la lumière électrique, il n'en résulte pas que ce soit une lumière sans chaleur : en effet, nous verrons par les expériences suivantes que, dans beaucoup de cas, l'électricité agit comme le feu, et qu'elle devient souvent un agent chimique des plus puissans.

Une bougie qui vient d'être éteinte se rallume à l'instant lorsqu'on tire une étincelle à travers la mêche encore chaude.

L'étincelle peut enflammer l'éther et même l'alcool; ces liquides sont dans un petit vase de métal, que l'on approche d'un corps électrisé, de manière que l'étincelle parte à la surface du liquide; le corps électrisé peut être une personne isolée communiquant avec la machine.

Le pistolet de Volta est représenté *figure* 60; c'est un petit vase en métal qui se ferme par un bouchon de liége; un fil de cuivre terminé par deux petites boules b, b' passe du dedans au dehors sans toucher les parois; pour cela on le mastique avec de la cire dans un tube de verre tt'; l'étincelle qui entre par ce fil doit passer de la boule b' à la paroi opposée, en traversant le gaz qui remplit le pistolet. Si ce gaz est détonant, s'il est par exemple un mélange d'hydrogène et d'air, ou mieux encore d'hydrogène et d'oxigène, dans les proportions qui font l'eau, l'étincelle détermine l'action chimique, la détonation a lieu, le bouchon est lancé au loin et de l'eau est formée.

On doit à M. Wollaston un procédé ingénieux pour décomposer l'eau par l'électricité ordinaire : on fait déposer de l'or dans un tube de verre d'un diamètre très-fin, qui est fermé à l'une de ses extrémités; ensuite cette extrémité est usée avec une lime, jusqu'au point de découvrir à la loupe les premières parcelles métalliques; ce tube est recourbé (*Fig.* 62) et placé dans un vase d'eau communiquant au sol; un fil de métal qui touche l'or intérieur,

communique avec une puissante machine; l'électricité est forcée de passer de la machine dans le tube, de sortir de celui-ci par la petite pointe de métal qui a été mise à découvert, pour se répandre ensuite dans l'eau, et de là dans le sol : or, dans ce passage presque infiniment étroit qui lui est laissé, elle exerce contre l'eau une telle action, que l'on aperçoit de petites bulles de gaz s'élever à la file, et les gaz recueillis sont bien de l'hydrogène et de l'oxigène mélangés; ce qui est une preuve certaine de la décomposition de l'eau.

Ces expériences suffisent pour nous donner une idée de la puissance chimique de l'électricité, et, dans la suite des phénomènes curieux que nous avons encore à étudier, nous serons prévenus que les fluides électriques ne traversent pas la masse pondérable des corps sans y exercer des actions moléculaires, et sans développer dans leurs derniers élémens des forces d'agrégation et de ségrégation non moins énergiques que celles que développe la chaleur.

CHAPITRE II.

De l'Electricité par influence.

335. *Un corps électrisé décompose à distance les électricités naturelles de tous les corps conducteurs.* — Nous venons de voir que chacun des fluides électriques attire le fluide de nom contraire, et repousse celui de même nom; ces attractions et répulsions n'ont pas lieu seulement sur les fluides libres et déjà décomposés, mais elles s'exercent aussi sur les fluides combinés; et il résulte de là qu'un corps conducteur peut, *sans rien perdre et sans rien recevoir*, être constitué dans un état électrique particulier, qui naît de la cause agissante à laquelle il est soumis, et qui cesse avec elle. C'est cette électricité produite à distance, que l'on appelle *électricité par influence*.

Par exemple, un anneau de cuivre *nn'* (*Fig.* 63), portant deux fils de métal très-fins et deux balles de sureau, est soutenu sur un tube ou sur un crochet en verre; on le présente à un corps R, électrisé résineusement, et à la distance de plus d'un pied, l'on voit les deux balles qui s'écartent l'une de l'autre pour prendre la position *bb'*. A une distance plus petite la divergence est plus grande, sans que l'étincelle jaillisse entre l'anneau et le corps électrisé. Les balles *bb'* sont donc chargées d'une même électricité, et même il est facile de reconnaître que cette électricité est résineuse, comme celle du corps R qui agit sur l'anneau et sur elles. Cependant il n'en faudrait pas conclure qu'il y a une communication électrique au travers de l'air; car, en

éloignant l'anneau, soit lentement, soit rapidement, la divergence diminue à mesure que la distance augmente, et elle devient tout-à-fait nulle quand la distance est assez grande; ce qui n'arriverait pas si les balles ou l'anneau avaient reçu du corps R une électricité quelconque. Tout le phénomène se passe donc dans les balles et l'anneau, et dans les fils de métal qui les joignent. Ce système de corps conducteurs a ses fluides naturels décomposés par l'influence du corps électrisé; tout le fluide vitré qui résulte de cette décomposion se rassemble dans l'anneau, où il est appelé par l'attraction de R, et tout le fluide résineux est refoulé dans les balles par la répulsion. Ainsi, ces deux fluides sont simplement *déplacés*, dans le système conducteur; ils se rejoignent par leur attraction mutuelle, et se recomposent dès que la distance du corps électrisé est trop grande pour les maintenir séparés.

Pour ne laisser aucun doute sur cette vérité fondamentale, il suffit de venir toucher l'anneau avec un petit *plan d'épreuve* (1) que l'on retire à l'instant, et de montrer qu'en effet ce plan d'épreuve est chargé d'électricité vitrée, tandis que les balles divergent par de l'électricité résineuse. On dit quelquefois qu'un corps est dans *la sphère d'activité* ou hors de la sphère d'activité d'un corps électrisé, suivant qu'il en ressent ou n'en ressent pas l'influence; mais il faut remarquer que ces expressions, dont on peut se servir sans inconvénient, sont bien moins relatives au corps électricité lui-même qu'au corps que l'on soumet à son influence : rigoureusement, la sphère d'activité d'un corps électrisé s'étend à l'infini, et la distance à laquelle nous pouvons rendre ses effets sensibles dépend de la mobilité des appareils que nous employons.

(1) Le *plan d'épreuve* est un petit disque de clinquant ou de papier doré, de quelques lignes de diamètre, qui est collé par son bord ou par son centre à une longue aiguille de gomme laque.

On peut encore disposer l'expérience de la manière suivante : cc' (*Fig.* 64) est un *excitateur* (on nomme ainsi une tige de cuivre terminée comme le représente la figure; le plus souvent elle peut se tirer et s'allonger comme une lunette); on suspend à chacune de ses extrémités un double pendule à fil de lin ou de mélal, et on le place sur un isoloir *s*; alors on approche un corps électrisé R, et l'on observe une divergence dans les balles : si le corps est électrisé résineusement, comme le représente la figure, l'électricité vitrée se porte et s'accumule dans la partie de l'excitateur qui en est la plus voisine, et la résineuse est refoulée à l'extrémité opposée; c'est ce qu'on peut vérifier en approchant un tube de verre électrisé ou un bâton de résine, ou en prenant de l'électricité avec le plan d'épreuve pour en reconnaître la nature. Le contraire arriverait si le corps R était électrisé vitreusement.

Un corps électrisé par influence agit à son tour, pour électriser les corps voisins qui se trouvent dans sa sphère d'activité, et ces actions successives peuvent se propager jusqu'à de grandes distances. Il suffit de jeter les yeux sur la *figure* 66, pour voir la disposition que l'on peut donner aux appareils dans ces expériences. M est un conducteur de la machine, c un premier cylindre isolé, c' un second cylindre pareil, B une boule de cuivre, et *b* une petite balle de sureau. La divergence des balles indique la présence de l'électricité, et les signes + et — marquent son espèce.

Lorsqu'un corps conducteur est déjà chargé d'électricité, il n'en éprouve pas moins l'influence d'un autre corps électrisé; une seule expérience suffit pour montrer combien de phénomènes curieux peuvent résulter de ce principe. Le petit anneau à pendules, de la première des expériences qui précèdent, est électrisé résineusement; on lui présente un corps électrisé résineusement comme lui, et la divergence des balles augmente. Donc son électricité résineuse est repoussée et refoulée dans les balles, par l'électricité

résineuse qui agit sur lui par influence; ou, si l'on veut, ses électricités naturelles sont séparées; la résineuse est refoulée dans les balles, où elle s'ajoute à la résineuse qui s'y trouve déjà, tandis que la vitrée est appelée dans l'anneau, où elle neutralise une égale portion de résineuse, en se recomposant avec elle. La charge primitive de l'anneau et celle du corps qu'on lui présente peuvent être telles que, pendant l'action par influence, l'anneau se trouve encore électrisé résineusement, ou qu'il reprenne son état naturel, ou même qu'il se montre avec une charge d'électricité vitrée. C'est ce que l'on peut vérifier avec le plan d'épreuve. Ces phénomènes sont plus apparens, lorsqu'on donne à l'anneau une charge primitive d'électricité vitrée; alors, sous l'influence des corps résineux, qu'on en approche graduellement, les balles se rapprochent peu à peu, reviennent au contact, et divergent de nouveau; ce qui prouve d'une manière évidente que leur électricité vitrée a été peu à peu appelée dans l'anneau, qu'elle y est venue en totalité; et qu'enfin, pour une moindre distance du corps agissant, il s'est fait une décomposition nouvelle qui refoule du fluide résineux dans les balles, et qui leur donne une nouvelle divergence.

336. *Les corps électrisés par influence retombent à leur état primitif dès que l'influence cesse.* — Puisque la décomposition par influence est instantanée dans les corps conducteurs, la récomposition doit être instantanée dès qu'on détruit la cause décomposante. Or, on peut en général la détruire de deux manières : soit graduellement, en tirant des corps électrisés de petites étincelles avec un corps isolé, ou en augmentant la distance du corps conducteur qui reçoit son influence; soit subitement, en tirant du corps électrisé un étincelle totale, qui le décharge complètement lorsqu'il est lui-même conducteur. Dans le premier cas, la recomposition est graduelle comme la diminution de la force, et l'on s'en aperçoit à la divergence

des balles, qui diminue de plus en plus ; dans le second cas, les deux électricités séparées par influence se rejoignent par leur attraction mutuelle, et se recomposent en totalité, comme on le voit par le rapprochement des balles, qui est subit et complet. Dans ces phénomènes, ni l'un ni l'autre des fluides ne sort de la masse qui reçoit l'influence électrique ; mais ils éprouvent tous deux un mouvement de translation dans l'étendue de cette masse, soit quand ils se séparent, soit quand ils se rejoignent ; et ces mouvemens rapides de l'électricité produisent dans les molécules pondérables des secousses mécaniques ou des effets chimiques très-remarquables.

Par exemple, une grenouille, préparée et disposée, comme on le voit dans la *figure* 65, semble n'éprouver aucun effet lorsqu'on tourne lentement la machine qui charge d'électricité vitrée le conducteur *c* ; cependant son électricité naturelle est décomposée par influence, la résineuse est appelée en n, tandis que la vitrée est repoussée dans le sol par le fil s, et dès qu'on tire une étincelle au conducteur, la recomposition subite des électricités de la grenouille imprime à tout son corps une sorte de convulsion, qui la fait sauter comme si elle s'élançait par un mouvement volontaire ; preuve frappante que, dans le retour à l'état naturel, les molécules des corps sont agitées par les fluides qui se pressent pour se rejoindre. Les commotions de cette espèce s'appellent *le choc en retour*. L'expérience serait tentée sans succès sur une grenouille tuée depuis cinq ou six heures ; mais elle réussit très-bien avec une grenouille qui vient d'être coupée et dépouillée, et mieux encore avec une grenouille vivante, telle qu'elle sort de l'eau.

En présence d'une puissante machine, un homme qui communique au sol éprouve des secousses analogues ; on en peut faire l'expérience avec un conducteur d'une grande superficie : deux personnes placées aux deux extrémités de ce conducteur, n'éprouvent pas d'effets sensibles pendant

qu'il se charge; mais l'une d'elles s'approchant assez près pour tirer des étincelles, l'autre, à l'instant, éprouve toute la violence du choc en retour, sans qu'il paraisse aucune trace d'électricité ni de lumière, entre elle et le conducteur chargé.

Parmi les malheureuses victimes frappées de la foudre, on en compte un assez grand nombre qui sont mortes subitement, par la seule influence de la *queue du nuage*; car un nuage orageux est analogue au conducteur de l'expérience précédente; il décompose par influence les électricités naturelles de tous les corps conducteurs qui sont dans sa sphère d'activité; et quand l'éclair jaillit, c'est toujours entre lui et l'un de ces corps: celui-ci est foudroyé *directement*, par ce qu'on appelle alors la *tête du nuage*, et les autres sont foudroyés *par influence* ou *par le choc en retour*.

Quand le corps conducteur qui reçoit l'influence électrique n'est pas en communication directe avec le sol, il se peut faire qu'il perde peu à peu celle de ses électricités qui est repoussée, et qu'ensuite, la cause décomposante étant subitement détruite, il perde tout à coup, par une seule étincelle, l'autre électricité qui s'est accumulée sur sa surface. C'est ce qu'il est facile de vérifier avec un pistolet de Volta convenablement disposé en présence des conducteurs de la machine.

367. *En touchant les corps conducteurs, lorsqu'ils sont soumis à l'influence, on en peut tirer l'une ou l'autre électricité; mais on ne peut les charger que d'une seule électricité, en les mettant en communication avec le sol.* — Reprenons l'un des cylindres isolés de la figure 66, et supposons que ses électricités naturelles soient décomposées par l'influence de la machine; son fluide résineux étant appelé en R, son fluide vitré repoussé en V, et la *ligne neutre n n'* marquant sur sa surface les points qui séparent les deux fluides contraires; dans cet état, si l'on vient le toucher avec un plan d'é-

preuve, on prendra de l'électricité résineuse dans la région n R; de la vitrée dans la région n V, et l'on ne prendrait point d'électricité sensible sur la ligne neutre $n n'$. Mais, si au lieu de toucher le cylindre avec un plan d'épreuve très-petit, on vient le mettre en communication avec le sol, on obtiendra des résultats tout-à-fait différens : s'il communique au sol par un point de la région n V, tout le fluide vitré s'écoule, et le fluide résineux reste en totalité, maintenu par l'attraction du fluide vitré de la machine; s'il communique au sol par un point de la région n R, c'est *encore le fluide vitré* qui s'écoule, et le fluide résineux qui reste. Phénomène remarquable, très-facile à vérifier, et aussi très-facile à expliquer; car le fil de métal qui établit la communication avec le sol, éprouve lui-même la décomposition par influence; son fluide vitré est refoulé dans le sol, tandis que son fluide résineux est attiré, passe sur le cylindre, et neutralise, en s'y répandant, tout le vitré qui s'y trouve; le résultat est le même que si le cylindre avait été en communication avec le sol, avant d'éprouver l'influence des conducteurs de la machine. Or, si en touchant la région n R, avec le plan d'épreuve, qui est très-petit, on en tire de l'électricité résineuse, et si en la touchant avec le sol qui est très-grand, on en tire de la vitrée, il faut bien qu'il existe des corps isolés, d'une certaine dimension, qui n'en pourraient tirer ni l'un ni l'autre des fluides. Cette conséquence est importante, et nous ne la présentons ici que pour indiquer d'avance, 1° que dans la décomposition par influence, le lieu et la forme de la ligne neutre dépendent d'une foule de conditions, et 2° que dans le contact des corps électrisés il se produit des phénomènes très-complexes.

368. *Des électroscopes et de leurs usages.* — Nous avons déjà fait connaître le pendule électrique, l'aiguille électrique et l'électroscope de Colomb; mais on a été conduit par les phénomènes de l'électricité par influence, à construire d'autres électroscopes qui conservent mieux l'électricité

qu'on leur donne, et qui sont plus propres à donner approximativement une idée des forces électriques qui les sollicitent. Tous ces appareils se composent essentiellement d'un *vase en verre*, d'un *conducteur fixe* et d'un *conducteur mobile*.

Le *vase en verre* a la forme d'une cloche ou d'un flacon; l'orifice supérieur est étroit, et le fond peut être de verre (*Fig.* 69); mais le plus souvent il est en métal (*Fig.* 67 et 68), et alors il porte deux boules de cuivre (*Fig.* 67), ou bien il communique à deux petites lames d'étain *e e'* (*Fig.* 68), qui sont collées verticalement sur les parois intérieures de la cloche.

Le *conducteur fixe* est une petite lame métallique, qui se termine en haut par une boule (*Fig.* 67 et 68) ou par un anneau (*Fig.* 69); elle est mastiquée avec de la gomme laque dans le col du vase, et même pour plus de précautions l'on vernit la surface extérieure du verre jusqu'à une distance *v v'*.

Le *conducteur mobile* est suspendu à l'extrémité inférieure du conducteur fixe; c'est de sa nature que dépend le nom de l'électroscope : dans *l'électroscope à pailles*, il se compose de deux pailles légères, que l'on suspend au conducteur fixe par de petits anneaux de fil de métal très-fin (*Fig.* 69); dans *l'électroscope à lames d'or*, il se compose de deux lames d'or qui se collent par la simple apposition, sur l'extrémité aplatie du conducteur fixe (*Fig.* 68); dans *l'électroscope à balles de sureau*, il se compose de deux fils de métal très-fins, qui s'attachent comme les pailles, et qui portent à leur extrémité inférieure de petites balles de sureau *b b'* (*Fig.* 67). Ces conducteurs mobiles viennent dans leur plus grande divergence, toucher les boules *s s'* ou les lames d'étain *e e'*, pour se décharger de leur électricité; car s'ils allaient toucher la surface du verre, ils y resteraient adhérens et lui communiqueraient une électricité qui pourrait pendant long-temps troubler les résultats.

Les expériences dont nous avons parlé (365 et 366) suffisent pour indiquer l'usage des électroscopes : lorsqu'on voudra simplement reconnaître la présence de l'électricité dans un corps, il faudra l'approcher graduellement du conducteur fixe de l'électroscope, et observer la divergence toujours croissante des conducteurs mobiles ; de deux corps de même forme, placés à la même distance, celui qui produira la moindre divergence aura évidemment la moindre force électrique ; mais les intensités ne seront pas proportionnelles aux angles d'écart, elles suivent une loi beaucoup plus compliquée. Lorsqu'on voudra reconnaître l'espèce d'électricité que possède un corps, il faudra préalablement donner à l'électroscope une électricité connue ; ce qui se fait de la manière suivante : on approche un corps électrique, et en même temps on touche avec le doigt le bouton de l'électroscope ; le fluide *repoussé* passe dans le sol (367), et en retirant le doigt *d'abord*, et *ensuite* le corps électrisé, l'électroscope reste chargé du fluide *attiré* ; c'est-à-dire du fluide contraire à celui du corps qu'on lui présente. Dans cet état, tout corps qu'on en approche, et qui augmente sa divergence, est certainement chargé de la même électricité que l'électroscope ; mais l'inverse n'a pas lieu : tout corps qui diminue la divergence, n'est pas certainement chargé d'une électricité contraire à celle de l'électroscope ; car les corps conducteurs, pris dans leur état naturel, doivent eux-mêmes produire cet effet sur les conducteurs mobiles, à cause de la décomposition par influence qu'ils éprouvent. Ainsi, l'augmentation de divergence est une épreuve décisive, tandis que la diminution est une épreuve incertaine ; à moins toutefois que cette diminution ne soit très-grande, et que le corps qui la produit, étant approché davantage, ne soit capable de déterminer une divergence contraire, après avoir ramené jusqu'au contact les conducteurs mobiles de l'électroscope.

Quand l'air est humide, l'électricité se perd prompte-

ment, et il serait impossible alors de faire des expériences comparatives avec les électroscopes, si l'on n'avait soin de dessécher l'air qu'ils contiennent, avec quelques fragmens de muriate de chaux; et même il est bon de dessécher aussi l'air qui les environne, en les enveloppant d'une cage, au fond de laquelle on place des corps propres à absorber l'humidité.

369. *De l'électrophore.*— Cet instrument, imaginé par Volta, repose encore sur les principes de l'électricité par influence; il se compose d'un *gâteau* de résine G (*Fig.* 70), d'un *plateau* P auquel est adapté un manche isolant *m*. La résine est coulée dans un moule en bois ou en métal : il importe que sa surface supérieure soit sensiblement plane, le plateau est en cuivre avec un rebord arrondi, ou simplement en bois revêtu d'étain, son diamètre est moindre d'un ou deux pouces que celui du gâteau. Après avoir électrisé toute la surface de la résine en la battant avec une peau de chat, on pose sur elle le plateau par son manche isolant, et avec le doigt on en tire une étincelle; c'est son électricité résineuse qui s'écoule dans le sol; ensuite en relevant le plateau, on le trouve fortement chargé d'électricité vitrée. On peut répéter l'expérience plusieurs centaines de fois de suite sans qu'il soit nécessaire de donner au gâteau une nouvelle charge avec la peau de chat. L'électricité de la résine agissant par influence sur les électricités naturelles du plateau à travers la mince couche d'air qui l'en sépare, y produit une grande décomposition, et l'électricité vitrée qu'elle attire, ne peut pas venir la neutraliser, parce qu'elle ne peut pas s'accumuler sur un point pour vaincre la résistance de l'air. L'électrophore vaut à lui seul une machine électrique.

370. *Expériences diverses.*—Devant le conducteur *c* de la machine est un timbre *t* communiquant au sol, et un pendule isolé (*Fig.* 71); le conducteur électrisé vitreusement attire d'abord le pendule, le charge d'électricité

vitrée, et ensuite le repousse : le timbre, au contraire, étant, par l'influence du conducteur, électrisé résineusement dans sa partie antérieure, attire le pendule quand le conducteur le repousse, le décharge de son électricité vitrée, pour lui en donner de la résinense, et le repousse vers le conducteur, qui l'attire à son tour. De là les oscillations rapides du pendule, qui se continuent aussi long-temps que l'on tourne la machine pour électriser le conducteur.

Au lieu du timbre on peut prendre une boule de métal, et au lieu du pendule une *araignée* faite en liége, un peu brûlé à sa surface, et suspendue à un fil de soie; à cause de l'imparfaite conductibilité du liége, les pates de l'araignée semblent s'attacher pendant quelques instans aux corps électrisés qu'elles touchent (*Fig.* 72).

Une feuille d'or battu, placée sur un petit plateau de métal communiquant au sol, et à quelques pouces au dessous du conducteur de la machine, est alternativement attirée et repoussée, et exécute ainsi une série d'oscillations analogues à celles du pendule; c'est de cette manière que l'on fait la danse des pantins, en disposant de petits bons-hommes de liége diversement ornés, entre deux plateaux de métal, distans de cinq ou six pouces, dont l'un communique au sol, et l'autre au conducteur de la machine.

Ces expériences, qui ne semblent que des jeux d'enfans, ont suggéré à Volta une ingénieuse idée pour expliquer le phénomène de la grêle. Nous reviendrons sur ce sujet dans la Météorologie; mais nous pouvons dès à présent indiquer l'expérience par laquelle Volta imite les divers mouvemens que les grelons exécutent entre les nuages, avant de tomber en masse sur la terre. *c* (*Fig.* 74) est une grande cloche en verre, dont le fond est de métal et communique au sol; le plateau supérieur *p* communique à la machine, et dès que l'électricité se fait sentir, les balles de sureau qui étaient tranquilles sur le fond, s'élèvent, le touchent, retombent

et s'élèvent de nouveau : pendant qu'elles exécutent ces mouvemens alternatifs, elle se heurtent de mille manières, et donnent une idée de cette espèce de cliquetis ou de bruissement que l'on entend dans les nuages quelques instans avant la chute de la grêle.

CHAPITRE III.

Des forces électriques.

371. *Les attractions et les répulsions électriques sont en raison composée des quantités de fluide, et en raison inverse du carré des distances.* — Cette loi fondamentale des actions électriques a été découverte par Coulomb, comme la loi fondamentale des actions magnétiques, et c'est par des moyens analogues, savoir : par la balance de torsion et par les oscillations d'une petite aiguille, qu'il est parvenu à en démontrer la vérité. La balance électrique diffère peu de la balance magnétique : dans la construction de cette dernière, il faut éviter soigneusement l'emploi des corps ferrugineux; dans la construction de la première, il faut éviter avec le même soin l'emploi des corps conducteurs. On la construit de la manière suivante : sur une table en bois très-sec, on établit par incrustation quatre grandes glaces carrées, de 30 à 40 pouces de côté (*Fig.* 75); leurs bords verticaux sont travaillés de manière qu'ils se joignent très-exactement, et on les colle ensemble, de peur que l'air n'y puisse trouver quelque issue. Une cinquième glace, un peu plus grande, s'ajuste sur les premières pour fermer exactement l'appareil; elle est percée de deux ouvertures circulaires, l'une au centre, sur laquelle s'élève un tube de verre T, de 12 à 15 pouces de hauteur et de 2 ou 3 pouces de diamètre, et l'autre sur le côté, par laquelle on introduit les corps électrisés. Au dessus du tube de verre est un micromètre pareil à celui de la balance magnétique (*Fig.* 36); le fil de cuivre ou d'argent qui est fixé au treuil de ce mi-

cromètre porte à sa partie inférieure une légère aiguille en gomme laque, très-bien équilibrée, et terminée par une petite balle de sureau ou par un disque de clinquant de 6 à 8 lignes de diamètre. Sur le contour de la cage, et vers le milieu de sa hauteur, est une bande de papier qui porte les degrés; le fil de torsion doit toujours, comme nous l'avons vu (327), passer par le centre de ces divisions. Au fond de la balance on met du muriate de chaux dans une capsule, pour absorber l'humidité de l'air.

Pour déterminer, avec cet appareil, la loi des répulsions électriques, on donne d'abord de l'électricité à la balle de l'aiguille suspendue; et ensuite, à l'extrémité d'un tube de verre ou d'un fil de soie, enduit de gomme laque, est une autre balle électrisée de la même manière, que l'on fait descendre dans la balance, avec la précaution de la maintenir à très-peu près sur la circonférence que la balle mobile peut décrire dans son mouvement révolutif. La répulsion s'exerce entre ces deux balles comme entre deux pôles magnétiques de même nom, et l'expérience s'achève en effet, comme celle que nous avons rapportée (318). En donnant aux balles des électricités contraires, on détermine aussi la loi des attractions électriques comme celles des attractions magnétiques.

Pour démontrer que les attractions et les répulsions sont en raison composée des quantités d'électricités, il faut s'appuyer sur ce principe évident de lui-même : que deux sphères conductrices et de même rayon, qui sont mises en contact, se partagent également les électricités qu'elles possèdent. Ainsi, après avoir observé la force de torsion qui fait équilibre à l'action attractive ou répulsive des deux balles à une distance connue, si l'on vient toucher l'une d'elles avec une troisième balle isolée, qui lui soit exactement pareille, on lui enlève la moitié de l'électricité qu'elle possède, et l'on reconnaît que, pour la même distance, la force de torsion se trouve réduite à moitié. En prenant

une seconde fois, par le même procédé, la moitié du fluide qui reste encore sur l'une ou sur l'autre des balles, on réduirait encore la force à la moitié de sa valeur, et si l'on prenait simultanément la moitié du fluide qui se trouve sur chacune des balles, la force serait réduite au quart de ce qu'elle était.

Coulomb a encore constaté les mêmes lois et avec la même précision, en faisant osciller, devant un globe électrisé, une petite aiguille de gomme laque suspendue à un fil de soie, et portant à l'une de ses extrémités un disque de clinquant, destiné à recevoir l'un ou l'autre fluide. Cet appareil devient tout-à-fait semblable à celui que nous avons décrit (320); seulement, la réaction électrique qui s'exerce alors entre le globe et le disque est la seule cause des oscillations; d'où il résulte que, pour des charges ou pour des distances différentes, les intensités des forces sont entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations que l'aiguille exécute dans le même temps.

372. *De la perte de l'électricité par l'air et par les supports.*—L'électricité des corps disparaît avec le temps : elle se dissipe dans l'air ou s'écoule dans le sol; c'est un fait qui se constate par toutes les expériences électriques. Ne pouvant empêcher cette déperdition, nous devons nous attacher à la rendre plus lente, plus régulière et plus mesurable; sans cela toute comparaison serait impossible entre les forces, puisqu'à chaque instant elles seraient variables et changeraient irrégulièrement suivant des lois inconnues.

La perte, par les supports isolans, se fait en partie au travers de leur substance, et en partie sur la mince couche d'humidité dont ils sont très-souvent revêtus. Cette dernière cause est très-influente pour le verre et la soie, qui absorbent la vapeur d'eau avec une grande avidité; c'est pourquoi il est toujours nécessaire d'enduire la surface de ces corps d'une couche de gomme laque, soit en les plon-

geant dans de la gomme laque fondue, soit en les couvrant d'un vernis de cette substance. Avec cette précaution, les supports de verre et de soie, et ceux de gomme laque pure, isolent à peu près au même degré : il paraît même, d'après les expériences de Coulomb, qu'ils peuvent isoler complétement les faibles charges électriques, lorsqu'ils ont une longueur de 15 ou 20 pouces, et qu'on prend soin de les chauffer avant l'expérience, pour vaporiser l'humidité qui s'y attache. Cependant, puisqu'ils n'isolent complètement que sous la condition d'avoir une grande longueur, il est évident qu'ils s'imprègnent toujours d'une petite quantité d'électricité, et l'on conçoit ainsi qu'une charge plus forte, réagissant sur elle-même avec plus d'énergie, repousse le fluide jusqu'à l'extrémité du support et le force à passer dans le sol, par un écoulement lent mais continu. On reconnaît qu'un corps est parfaitement isolé, lorsqu'en le soutenant par plusieurs supports il éprouve la même perte que s'il était soutenu par un seul, et l'on est alors bien assuré que la perte qu'il éprouve est due au contact de l'air.

La perte de l'air est due en grande partie à la vapeur d'eau qui est toujours plus ou moins abondante dans l'atmosphère, car elle augmente à mesure que l'hygromètre marche à l'humidité : le fait est si frappant que, par exemple, si l'on souffle sur un tube électrisé ou sur un bâton de résine, il ne reste pas de trace de son électricité; il en est de même quand on souffle sur un corps conducteur isolé; mais, dans ce cas, il ne faut pas souffler de trop près, de peur de recevoir la commotion. L'électricité qui s'écoule ainsi par la vapeur d'eau se répand de proche en proche dans l'atmosphère environnante, et il est probable que la transmission ne se fait pas sans que les molécules de vapeur éprouvent une grande agitation. Toute la perte d'électricité qui se fait dans l'air n'est pas due à la présence de la vapeur : l'air le plus complètement desséché par le muriate de chaux, par l'acide sulfurique ou par les autres corps absorbans, laisse encore

échapper, avec le temps, une certaine proportion du fluide électrique des corps qu'il enveloppe. On en peut faire l'expérience dans la balance de Coulomb, après avoir desséché l'air qu'elle contient et après avoir électrisé la balle de l'aiguille et la balle fixe. Supposons, par exemple, que ces deux balles soient maintenues à 20° de distance, par une torsion de 250° du micromètre supérieur; la force qui fait équilibre à la répulsion électrique est alors de $250 + 20 = 270°$; avec le temps on verra les deux balles se rapprocher, et après 1′ il faudra détordre le micromètre supérieur de 6°, par exemple, pour la remettre à la distance primitive de 20°. Ainsi, en 1′, *la force électrique perdue* sera celle qui fait équilibre à 6° de torsion; et si l'on veut avoir son rapport à la *force électrique moyenne* qui a lieu pendant cette minute, il suffira de remarquer qu'au commencement cette force était 270°; qu'à la fin elle était $244 + 20 = 264$, dont la moyenne est $\frac{270 + 264}{2} = 267$; d'où il résulte enfin que la perte a été, pendant une minute, $\frac{6}{267} = \frac{1}{44,5}$; c'est-à-dire un quarante-quatrième à peu près de la force moyenne.

C'est de cette manière que Coulomb est parvenu à évaluer exactement la perte par l'air: dans les jours secs, on trouve souvent qu'elle n'est par minute que $\frac{1}{60}$ ou même $\frac{1}{70}$ de la force moyenne; mais dans les temps un peu humides elle est quelquefois de $\frac{1}{20}$: alors il est à peu près impossible de faire des expériences exactes. Lorsqu'il y a peu de variations atmosphériques soit dans la chaleur, soit dans la direction du vent, la perte par l'air reste sensiblement la même, dans le cours d'une journée, et l'on peut facilement comparer la perte qui a lieu dans la balance à celle qui a lieu au-dehors sur un corps conducteur électrisé: pour cela on vient toucher ce corps avec une balle isolée ou avec un plan d'épreuve que l'on reporte à l'instant dans la balance; on le met en contact avec la balle de l'aiguille, et l'on observe la répulsion; puis, après quelques minutes, on répète la même expérience, en ayant soin toutefois de remettre à

l'état naturel le plan d'épreuve et la balle mobile, et alors on observe une répulsion moindre; ce qui est une marque certaine qu'au second contact le corps avait moins d'électricité, puisqu'il en a moins donné au plan d'épreuve. Or, en admettant, comme nous le verrons plus loin, qu'un corps donne au plan d'épreuve qui le touche, *au même endroit* et *de la même manière*, des quantités d'électricité proportionnelles à celles qu'il possède, on voit que les charges électriques du corps, aux deux époques du contact, seront proportionnelles aux forces de torsion, et qu'ainsi il sera facile de déterminer la perte qu'il a éprouvée dans l'intervalle. Ces moyens de comparer les forces électriques, et de calculer ce qu'elles doivent être à chaque instant, lorsqu'on sait ce qu'elles sont à une époque donnée, est une des plus belles inventions qui aient été faites en électricité; c'est par là seulement que Coulomb a pu poser, et qu'il a en effet posé, les principes fondamentaux de la science.

673. *Distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs.* — L'électricité naturelle est uniformément répandue dans toute la masse d'un corps conducteur, et elle y paraît accumulée en quantité indéfinie, comme la chaleur et le magnétisme; mais dès qu'un fluide est libre ou séparé de l'autre, il réagit sur lui-même par sa force répulsive, et toutes ses molécules tendent sans cesse à se disperser, jusqu'à ce qu'elles trouvent un obstacle qui les arrête. Un corps qui serait parfaitement conducteur n'offrirait dans toute sa masse aucune résistance à cette dispersion; et le fluide, parvenu rapidement à sa surface, en sortirait pour se répandre plus loin, s'il y rencontrait encore un espace également perméable. Le vide laissant passer l'électricité, un corps électrisé qui serait placé au milieu du vide perdrait à l'instant tout son fluide libre; ainsi la terre est probablement, parmi les planètes, la seule qui puisse être électrisée à sa surface, puisqu'elle est la seule qui pa-

raisse avoir une atmosphère autour d'elle. Nous verrons que les métaux eux-mêmes n'ont pas une conductibilité parfaite; cependant le fluide électrique passe avec une telle rapidité, d'un point à un autre de leur masse, que nous pouvons, du moins pour le moment, supposer que l'électricité dont ils sont chargés n'a aucune résistance à vaincre pour se mouvoir dans leur substance. Il résulte de cette hypothèse que l'électricité libre, développée en un point quelconque d'un conducteur métallique, vient toujours à sa surface où elle se trouve arrêtée par l'air environnant. Mais comment s'arrange-t-elle dans la masse entière du conducteur? Faut-il, pour l'équilibre, qu'elle s'y répande uniformément, comme l'air se répand dans un ballon? ou bien faut-il que ses molécules, obéissant à leur force répulsive, viennent s'accumuler et se presser contre l'air qui enveloppe sa surface, ou contre les corps non conducteurs qui la couvrent? Voici trois expériences qui peuvent jeter quelque lumière sur ce point fondamental de la théorie :

1°. Un globe isolé (*Fig.* 76) est recouvert de deux hémisphères en papier métallique ou en clinquant, que l'on peut à volonté mettre ou enlever, au moyen de deux manches de verre v et v': on l'électrise dans cet état; ensuite on enlève rapidement les hémisphères, et le globe ainsi dépouillé de son enveloppe est aussi dépouillé complètement de son électricité. Donc le fluide se porte à la surface, et s'y accumule de telle sorte qu'il n'en reste pas à l'intérieur.

2° Une sphère de 7 ou 8 pouces de diamètre, ayant une petite cavité de 8 ou 10 lignes de largeur et de 1 pouce de profondeur, est isolée et chargée d'électricité; lorsqu'on vient avec le plan d'épreuve la toucher à sa surface, on y prend du fluide; mais lorsqu'on la touche au fond de la cavité, le plan d'épreuve reste sensiblement à l'état naturel.

3° Enfin, deux sphères conductrices de même rayon sont électrisées ensemble, et ensuite séparées; on vient toucher l'une d'elles avec une sphère pleine en métal, et

l'autre avec une sphère de même rayon que la précédente, mais faite avec du clinquant ou du papier doré, ou simplement en collant des feuilles d'étain ou d'or battu sur un globe de résine ; après le contact on essaie, avec le plan d'épreuve et la balance, les forces électriques des deux premières sphères, et on les trouve exactement pareilles : donc la sphère pleine en métal n'a pas plus enlevé d'électricité à la première que la sphère *superficielle* n'en a enlevé à la seconde ; ce qui est une preuve évidente que l'électricité libre ne réside jamais dans l'intérieur des corps, qu'elle est toujours à la surface, et même qu'elle n'y occupe qu'une épaisseur insensible ; car si la couche de fluide électrique devait être plus épaisse qu'une feuille d'or battu, la sphère superficielle n'en prendrait pas autant que la sphère pleine.

Ces preuves expérimentales sont encore confirmées par une preuve mathématique : car cet arrangement de fluide électrique dans son état d'équilibre est une conséquence rigoureuse de la répulsion, qui agit sur ses molécules en raison inverse du carré de la distance.

De ce que le fluide électrique, repoussé par lui-même, forme à la surface des corps une épaisseur moindre qu'une feuille d'or battu, il n'en faudrait pas conclure que cette épaisseur est insensible, et qu'elle n'entre pour rien dans les phénomènes. Les dimensions qui échappent à la prise directe de nos sens n'en sont pas moins comparables entre elles ; et les épaisseurs infiniment petites des couches électriques peuvent être décuples ou centuples l'une de l'autre, comme les épaisseurs qui se comptent par toises ou par mètres. Sur un globe conducteur électrisé (*Fig.* 77), tout étant symétrique autour du centre, il est évident que la couche électrique doit avoir partout la même épaisseur ; ainsi elle est comprise entre la surface $e\,e'$ du globe, où elle s'arrête contre l'air, et une autre surface $i\,i'$, pareillement sphérique, qui passe *au dessous* ou *au dedans* de la

première, d'une quantité infiniment petite; cette surface *intérieure* de la couche électrique est sa surface *libre*; il semble d'abord qu'une molécule de fluide, telle que *m*, ne puisse être en équilibre dans cet état; mais en concevant le plan *p m p'*, on verra que, si tout le fluide qui est au dessus tend, par sa répulsion, à précipiter la molécule *m* vers le centre, tout le fluide qui est au dessus tend, au contraire, à la repousser vers la surface; et l'on démontre mathématiquement que, par la loi de la raison inverse du carré de la distance, ces deux forces opposées doivent exactement se faire équilibre. Il n'en est pas de même d'une molécule M de la surface extérieure; celle-ci est repoussée loin du centre par toutes les molécules du fluide; de là l'effort continuel qu'elle exerce contre l'air ou contre les corps non conducteurs sur lesquels elle s'appuie.

M. De Laplace a démontré que le fluide électrique a une force répulsive qui est partout proportionnelle à son épaisseur; et comme la pression qu'il exerce contre l'air ou contre les obstacles qui l'arrêtent est en raison composée de sa force répulsive et de son épaisseur, il en résulte que cette pression, en chaque point, ou sur chaque élément de surface, est proportionnelle au carré de l'épaisseur de la couche qui se trouve en ce point ou sur cet élément. Ainsi, le fluide électrique répandu sur les corps conducteurs, peut être considéré comme les fluides pondérables contenus dans des vases contre lesquels ils exercent des pressions : quand ces vases sont assez résistans, le fluide est contenu; quand ils sont trop faibles pour résister à la pression, les parois crèvent et le fluide s'écoule : pour le fluide électrique, le vase est le corps conducteur, la paroi est l'air qui l'enveloppe, ou la couche de vernis non conducteur qui le couvre; et quand l'épaisseur de l'électricité est assez grande, elle fend l'air ou elle perce la couche de vernis, et l'étincelle jaillit, ce qui est la marque d'un écoulement rapide du fluide. Quand la couche électrique

est arrêtée et maintenue en équilibre, il est évident que la somme des actions qu'elle exerce sur un point intérieur quelconque, tel que N, est toujours nulle; sans cela elle opérerait par influence une nouvelle décomposition des fluides naturels qui sont en ce point, et l'équilibre serait troublé.

Sur un ellipsoïde de révolution (*Fig.* 80), l'épaisseur électrique n'est plus la même aux différens points de la surface : il résulte des conditions mathématiques dont nous venons de parler, qu'au pôle p et en un point q de l'équateur les épaisseurs sont entre elles comme les rayons cp et cq, par conséquent les pressions sont entre elles comme les carrés de cp et cq. Par exemple, si l'ellipsoïde est très-allongé, de telle sorte que $cp = 100\ cq$, la pression au point p sera 10,000 fois plus grande qu'au point q ; c'est donc toujours par l'extrémité la plus amincie de l'ellipsoïde que le fluide devra s'écouler.

Une pointe très-aiguë peut toujours être considérée comme étant le pôle d'un ellipsoïde de révolution très-allongé ; ainsi, quelque faible que soit la charge électrique d'un tel corps, le fluide qui s'accumule à son sommet y formera toujours une épaisseur assez grande pour vaincre la résistance de l'air : de là *le pouvoir des pointes*, qui avait été découvert par Franklin avant qu'il fût expliqué par la théorie. On dit quelquefois que les pointes ont le pouvoir d'attirer le fluide électrique ; c'est précisément le contraire qu'il faut dire : elles ont la propriété de laisser écouler le fluide dont elles sont chargées. On peut faire une foule d'expériences sur cette propriété ; nous indiquerons les suivantes.

1° Une pointe aiguë étant placée sur les conducteurs de la machine, il devient impossible de leur donner de l'électricité et d'en tirer des étincelles ; le fluide se dissipe par la pointe à mesure qu'il se développe par le mouvement de la machine.

2° Une pointe communiquant au sol, étant présentée

aux conducteurs de la machine à un pied de distance, il devient pareillement impossible de les charger. L'électricité du conducteur décompose par influence les électricités de la pointe ; elle repousse dans le sol celle de même nom et attire celle de nom contraire, qui s'accumule à la pointe, et qui s'échappe à travers l'air pour venir neutraliser celle du conducteur.

3° Un *timbre à pointe* (*Fig.* 73) étant sous les conducteurs de la machine, à deux ou même à trois pieds de distance, le bruit des petits pendules p et p' annonce l'écoulement de l'électricité. Cette expérience est la même que la précédente ; les lignes noires représentent sur la figure les fils qui doivent être non conducteurs.

Nous devrons revenir sur les propriétés des pointes, lorsque nous parlerons de la lumière électrique, et surtout lorsque, dans la Météorologie, nous aurons à étudier l'électricité atmosphérique et la construction des paratonnerres.

Les angles et les arêtes des corps conducteurs présentent des phénomènes analogues à ceux des pointes ; c'est pourquoi il faut éviter soigneusement toutes les formes anguleuses dans les appareils qui sont destinés à conserver l'électricité.

Les résultats précédens nous conduisent à une question générale, dont nous pouvons maintenant comprendre le sens et l'étendue : des corps conducteurs sont donnés, on connait leurs formes et leurs grandeurs ; les uns sont à l'état naturel, les autres ont des charges connues d'électricité résineuse ou vitrée ; on les met en présence pour former un système connu de position ; on suppose que les fluides réagissent simplement sans passer d'un corps à l'autre, et l'on demande quel est l'état électrique d'un point quelconque de ce système ; c'est-à-dire, quelle espèce d'électricité s'y trouve, et quelle épaisseur elle y forme.

Coulomb a donné un moyen expérimental de résoudre

ce problème dans toute son étendue. Voici le principe sur lequel il repose : quand un plan d'épreuve très-mince et assez petit, est posé tangentiellement sur une surface électrisée, et retiré perpendiculairement sans la toucher par ses bords, il est chargé sur chaque face d'une épaisseur électrique qui est la moitié de celle que possédait la surface au point de contact. Coulomb a démontré ce principe en déterminant le rapport suivant lequel l'électricité se partage entre une sphère et un plan circulaire qui vient la toucher par son centre, et qui est retiré perpendiculairement. Mais on peut encore s'en rendre compte d'une autre manière : quand le plan d'épreuve est tangent à une surface, il se confond avec l'élément qu'il touche, il prend en quelque sorte sa place, relativement à l'électricité, ou plutôt il devient lui-même l'élément sur lequel le fluide se répand; ainsi, quand on retire ce plan, on fait la même chose que si l'on avait découpé sur la surface un élément de même épaisseur et de même étendue que lui, et qu'on l'eût enlevé pour le porter dans la balance sans qu'il perdît rien de l'électricité qui le couvre; une fois séparé de la surface, cet élément n'aurait plus dans ses différens points qu'une épaisseur électrique moitié moindre, puisque le fluide devrait se répandre pour en couvrir les deux faces. Ce principe posé, l'expérience n'exige plus que de l'habitude et de la dextérité : après avoir touché un point de la surface avec le plan d'épreuve, on l'apporte dans la balance, où il partage son électricité avec le disque de l'aiguille qui lui est égal, et l'on observe la force de torsion à une distance connue. On répète la même expérience, en touchant un autre point, et le rapport des forces de torsion est le rapport des répulsions électriques; on en prend la racine carrée pour avoir le rapport des épaisseurs. Ainsi, le génie de Coulomb a donné en même temps aux mathématiciens la loi fondamentale suivant laquelle la matière électrique s'attire et se repousse; et aux physiciens une balance

nouvelle et des principes d'expérience, au moyen desquels ils peuvent en quelque sorte sonder l'épaisseur de l'électricité sur tous les corps, et déterminer les pressions qu'elle exerce sur les obstacles qui l'arrêtent.

Le problème général dont nous venons de parler, et qui peut être dans tous les cas si facilement et si complètement résolu par l'expérience, peut être attaqué aussi par l'analyse mathématique. M. Poisson a publié deux Mémoires sur ce sujet (*Mém. de l'Institut*, 1811, 1re et 2e parties); en s'appuyant sur la loi de Coulomb, et sur quelques théorèmes fondamentaux de l'attraction des sphéroïdes démontrés par M. De Laplace, il parvient à des équations générales, qu'il résout ensuite, pour le cas d'un ellipsoïde ou de deux sphères, au moyen de ces savans artifices de calcul qui lui sont si familiers.

Dans l'impossibilité où nous sommes de faire connaître ce travail, même par extrait, nous nous contenterons de citer quelques-uns des résultats les plus remarquables; ils sont d'autant plus décisifs pour prouver l'exactitude de l'analyse, que Coulomb les avait démontrés par l'expérience (*Mém. de l'Académie*, 1787).

1°. Quel que soit le rapport des rayons de deux sphères électrisées, quand elles se touchent, l'épaisseur électrique est nulle au point de contact.

2°. A partir du point de contact l'épaisseur électrique croît lentement; dès qu'elle devient sensible, elle est plus grande sur la sphère du plus grand rayon; mais ensuite, à une certaine distance, elle commence à croître plus rapidement sur la plus petite sphère, de telle sorte qu'elle y est toujours plus grande à une demi-circonférence de distance du point de contact.

3°. En ces points, diamétralement opposés au point de contact, le rapport des épaisseurs est d'autant plus grand que la petite sphère est plus petite; mais il tend vers une limite qui est 4,2.

4°. Quand on sépare ces sphères, et qu'on les soustrait à leur action mutuelle, l'épaisseur électrique est toujours plus grande sur la plus petite; le rapport de ces épaisseurs tend pareillement vers une limite, qui est $\frac{5}{3}$.

5°. Quand on écarte seulement ces sphères à des distances diverses, de manière qu'elles restent soumises à leur influence mutuelle, leur électricité commune étant, par exemple, la vitrée, la petite sphère prend l'électricité *résineuse* au point *le plus voisin* de la grande sphère, et à une certaine distance autour de ce point; elle continue d'être électrisée *résineusement dans cette partie*, à mesure qu'on l'éloigne, mais de moins en moins; quand l'intervalle qui sépare les sphères est (dans les circonstances les plus favorables) égal à peu près au demi-rayon de la plus grande, l'électricité résineuse disparaît; et au delà, la petite sphère devient vitrée sur toute sa surface, comme la plus grande. Quand le rayon de la petite sphère surpasse le sixième du rayon de la grande, l'électricité résineuse paraît encore; mais elle disparaît avant que l'intervalle des sphères soit égal au demi-rayon de la plus grande.

6°. Quand une petite sphère, prise à l'état naturel, est électrisée par l'influence d'une sphère plus grande, elle réagit sur celle-ci pour troubler l'épaisseur uniforme de sa couche électrique, et alors cette épaisseur va en décroissant depuis le point le plus voisin de la petite sphère jusqu'à une distance de $\frac{3}{4}$ de circonférence; au delà elle redevient croissante jusqu'au point diamétralement opposé.

374. *Des machines électriques.* — Les machines électriques se composent d'un corps frottant, d'un corps frotté et d'un conducteur isolé.

Le corps frotté est quelquefois un grand cylindre en verre, mais le plus souvent il n'est qu'une glace circulaire P P′ (*Fig.* 78 et 81), qui peut avoir jusqu'à six pieds de diamètre: c'est ce qu'on appelle *le plateau* de la ma-

chine : il est porté sur un axe xx′, que l'on met en mouvement au moyen de la manivelle M.

Le corps frottant se compose ordinairement de deux paires de coussins élastiques F, F′ (*Fig.* 78, 79 et 81); ils sont rembourrés de crin; la face qui touche le plateau est en cuir, et la face opposée est une bande de bois ou de métal; chaque paire de coussins presse le plateau; on ajoute quelquefois un ressort *r* et une vis *v* pour varier à volonté la pression (*Fig.* 79).

Le conducteur de la machine est en laiton, sa forme se rapproche le plus possible du cylindre et de la sphère; on l'isole par de longues colonnes en verre, vernies à la gomme laque, L, *l*, *l′*.

Avant de mettre la machine en activité, on sèche avec des réchauds les colonnes et le plateau, on ôte les coussins, pour les frotter l'un contre l'autre, après avoir mis entre eux du deuto-sulfure d'étain, que l'on appelle *or musif*. Les coussins remis en place et convenablement pressés, on ajuste les garnitures ou les *armatures* en taffetas T, T′, qui couvrent de chaque côté deux quarts opposés du plateau, et l'on tourne la manivelle dans le sens de ces armatures. La machine ordinaire (*Fig.* 78) ne donne que de l'électricité vitrée; la machine de Van-Marum (*Fig.* 80 et 81) donne à volonté l'électricité résineuse ou la vitrée.

Lorsqu'on veut avoir l'électricité vitrée, on tourne l'arc A A′ verticalement, de manière que les cylindres C C′ qui sont à deux ou trois lignes du plateau, aboutissent près de l'extrémité des garnitures en taffetas, et l'arc *aa′* horizontalement, de manière que les cylindres *cc′* touchent les coussins. Alors la machine étant mise en mouvement, le plateau s'électrise vitreusement; son électricité, maintenue par les taffetas, ne se dissipe pas dans l'air; elle vient en présence des cylindres C C′, décompose par influence leurs électricités naturelles, repousse la vitrée dans l'arc A A′ et dans le globe G, tandis qu'elle attire la résineuse qui s'é-

chappe en étincelle, et qui vient la neutraliser : c'est ainsi que les conducteurs s'électrisent vitreusement. En même temps, l'électricité résineuse des coussins se répand dans les globes gg', dans l'arc aa', et de là dans le sol, par la chaîne hh'.

Lorsqu'on veut recueillir l'électricité résineuse, on dispose l'arc AA' horizontalement, de manière qu'il touche les coussins, dont il reçoit l'électricité résineuse, et l'on relève verticalement l'arc aa' qui communique toujours au sol, pour qu'il puisse décharger sans cesse le plateau et le remettre à l'état naturel; cette position des conducteurs mobiles est représentée dans les *figures* 79 et 81, par des lignes ponctuées.

Dans tous les cas, il y a une limite à la tension électrique que peuvent prendre les conducteurs; en effet, le plateau se charge, en passant sur les coussins, d'une épaisseur finie d'électricité vitrée. Cette électricité agit toujours par influence pour décomposer les électricités des conducteurs, et elle les décompose aisément quand ils sont à l'état naturel; mais quand ils sont eux-mêmes chargés d'électricité vitrée, la décomposition devient de plus en plus difficile, et l'on conçoit qu'il y a une limite où elle devient tout-à-fait impossible; alors le plateau ne peut plus produire aucune accumulation nouvelle, fût-il même animé d'une vitesse infinie de rotation. Les conducteurs pourraient, avec le temps, arriver à cette limite, s'ils n'éprouvaient aucune déperdition par l'air et par les supports; mais la perte qu'ils éprouvent devant se compenser à chaque instant, il faut que leur charge soit moindre afin que le plateau puisse encore décomposer leur électricité naturelle; et alors plus la rotation est rapide, plus ils reçoivent d'électricité dans le même temps : ainsi la limite de tension électrique que les conducteurs peuvent recevoir dépend de leur étendue, des qualités électriques du plateau et de sa vitesse de rotation.

Lorsqu'on veut tirer des étincelles à de grandes distances,

on fait communiquer aux conducteurs des machines, des *conducteurs secondaires* qui se chargent comme les premiers. Toute l'électricité qui couvre le système se déchargeant d'un seul coup, il est facile, en donnant aux surfaces une étendue convenable, de produire des lames de feu de plusieurs pieds d'étendue; mais il faut que la machine soit assez puissante pour compenser à chaque instant les pertes que font de si grandes surfaces, soit par le contact de l'air, soit par les supports.

CHAPITRE IV.

De l'Électricité dissimulée.

375. *De la dissimulation de l'électricité, et de sa recomposition lente ou subite.*—Concevons deux disques conducteurs cc' (*Fig.* 82) mis en présence et séparés par une lame non conductrice nn' en verre ou en résine; quand le disque c reçoit par exemple de l'électricité vitrée, et le disque c' de la résineuse, ces deux électricités s'attirent au travers de la lame non conductrice nn', et en pressent les deux faces opposées par l'effort qu'elles font pour se rejoindre; on dit alors que ces électricités sont *dissimulées*; et, en effet, quand les disques sont chargés, on peut les toucher l'un ou l'autre sans que leur fluide s'écoule dans le sol, mais il faut les toucher *séparément* et non pas *simultanément*; le fluide de celui qui est touché n'obéit pas à la force répulsive qui lui est propre, parce qu'il est attiré et retenu par le fluide de l'autre. Ainsi les plus fortes charges électriques s'accumulent sur les disques, se pressent sur les faces opposées de la lame non conductrice, et restent dissimulées l'une par l'autre tant que l'on n'offre d'issue dans le sol qu'à *l'un* des deux fluides. Supposons que les deux disques soient mathématiquement de même forme et de même grandeur; que la lame nn' soit bien plane sur ses deux faces, et partout également épaisse; et que la machine ou la source quelconque qui donne de l'électricité vitrée au disque c, par le moyen du fil *f*, soit exactement de même force que celle qui donne de l'électricité résineuse au disque c', par le fil *f'*, de telle sorte que tout soit symé-

trique de part et d'autre du plan pp' qui passe au milieu de l'épaisseur de NN'. Alors il est évident que les deux disques auront toujours des charges égales, et que dans les points symétriquement placés sur chacun d'eux les épaisseurs ou les tensions électriques seront aussi toujours les mêmes. Cela posé, voici un principe fondamental de l'électricité dissimulée : c'est qu'après avoir donné à l'appareil une charge quelconque, et l'avoir isolé ensuite en supprimant la communication des fils ff' sans les laisser toucher au sol, il arrive toujours que la *dissimulation est incomplète*, c'est-à-dire qu'il n'existe aucun point sur les disques ni sur les fils où la tension électrique soit tout-à-fait nulle. Cette tension est très-grande sur les faces intérieures i et i'; et là, quand les surfaces ont assez d'étendue, les fluides peuvent presser la lame NN' avec tant de force qu'ils s'ouvrent un passage au travers de sa substance et la percent pour se rejoindre; si cette lame est de résine ou de soufre, il se fait alors une multitude de petites fissures imperceptibles; mais si elle est de verre mince, les fluides ne font qu'un seul trou, par lequel ils se précipitent avec éclat pour se recomposer. Sur les faces extérieures e, $é$, et sur les fils ff', la tension électrique qui s'exerce contre l'air est très-faible en comparaison de la tension intérieure : mais elle existe, comme on peut s'en assurer avec le plan d'épreuve, ou même en présentant la jointure du doigt successivement à chaque disque ou à chaque fil, car on en tire de petites étincelles. La dissimulation ne peut pas être complète, parce que les fluides accumulés pour la plus grande partie sur les faces intérieures i et i', restent encore séparés par l'épaisseur dela lame non conductrice NN'; et que c'est au contact seulement qu'ils peuvent être neutralisés en totalité l'un par l'autre. Ainsi la dissimulation est d'autant plus parfaite que la lame non conductrice est plus mince; mais en même temps, plus la lame est mince, et moins elle offre de résistance à la pression électrique. C'est là, comme nous le

verrons tout à l'heure, ce qui limite le degré d'accumulation que nous pouvons donner à l'électricité.

L'appareil étant chargé comme nous venons de le dire, les électrités dissimulées peuvent se recomposer subitement ou lentement.

La *recomposition subite* se détermine de la manière suivante : on prend par ses manches isolans *m m' l'excitateur b c b'* (*Fig.* 83), dont les deux arcs en cuivre *b c*, *c b'* sont mobiles autour de la charnière *c*, on touche l'un des disques avec la boule *b*, et on approche de l'autre disque la boule *b'*, à un ou deux pouces de distance, l'étincelle jaillit avec beaucoup d'éclat et de bruit, et l'appareil est déchargé. Par la tension électrique qui est au point de contact *b*, une partie du fluide vitré se répand sur tout l'excitateur ; alors le fluide résineux est moins attiré qu'il n'était, son épaisseur diminue sur la face *i'* et augmente sur la face extérieure *e'*, d'où il attire le fluide vitré qui est en *b* : cette attraction fait affluer le fluide vitré vers *b'*, il s'accumule en cet endroit, il diminue sur le disque c, et en même temps le fluide résineux, devenu plus libre, se porte et s'accumule vers la face extérieure de c' où il est maintenant attiré ; enfin la tension est assez forte pour s'ouvrir un passage dans l'air, et tout le fluide se précipite et se recompose à l'instant.

La *recomposition* lente offre des phénomènes curieux, et montre mieux encore le jeu des électricités dissimulées. Les disques étant électrisés et isolés (*Fig.* 84), deux petits pendules *p p'* communiquant avec leurs faces extérieures éprouvent une répulsion produite par l'électricité qui est libre sur ces faces ; en touchant le disque c, par exemple, on en tire une petite étincelle, le pendule *p* retombe et le pendule *p'* se relève à l'instant comme si le disque c' eût pris une charge nouvelle ; mais cet accroissement de répulsion résulte seulement du fluide résineux qui est devenu libre par la perte de vitré qu'a éprouvée le disque c ; on touche en-

suite le disque c′, son pendule retombe, et celui de c se relève; on retourne au disque c : le même phénomène se reproduit, ainsi de suite alternativement, jusqu'à ce que l'appareil soit complètement déchargé.

Nous avons supposé que les disques recevaient de l'électricité, l'un d'une source résineuse et l'autre d'une source vitrée, et que chacun d'eux en recevait des quantités égales; mais le plus souvent on n'emploie qu'une seule machine; le disque c, par exemple, est mis en communication avec elle, et le disque c′ en communication avec le sol; alors celui-ci se charge *par influence*, et la charge qu'il prend est toujours moindre que la charge de c. Quand les communications sont rompues, le pendule p' est au repos et le pendule p diverge; mais la perte par l'air se trouvant proportionnellement plus grande sur le disque c, on voit son pendule s'abaisser peu à peu, tandis que le pendule p' se relève, et l'égalité de divergence une fois établie, la perte par l'air devient égale; les deux pendules retombent ensemble, d'autant plus lentement que l'air est plus sec. Au lieu de deux disques séparés par une lame de verre, on peut employer, pour les expériences précédentes, un simple carreau de verre, sur les faces duquel on colle des feuilles d'étain, en laissant à découvert sur les bords un espace de deux ou trois pouces que l'on vernit pour augmenter son inconductibilité. (*Fig.* 85.)

376. *Des condensateurs.* Tous les appareils dans lesquels on accumule de l'électricité dissimulée se composent essentiellement de deux lames conductrices, séparées par une lame non conductrice, et on les nomme en général des *condensateurs*, parce qu'en effet le fluide électrique paraît se condenser en se dissimulant. Ces appareils changent de forme et de nom suivant les usages auxquels on les destine.

Ceux qui nous ont servi aux expériences précédentes (*Fig.* 82, 83, 84 et 85) sont des *condensateurs à lames*

de verre; ils sont capables d'accumuler de grandes quantités d'électricité, mais à cause de l'épaisseur du verre ils ne peuvent être chargés que par des machines, par des électrophores, ou en général par des sources électriques d'une grande tension.

Le *condensateur à taffetas* (*Fig.* 86) est composé d'un disque en bois B B′, revêtu d'un taffetas vernissé $t\,t'$, et d'un plateau conducteur $c\,c'$ à manche isolant m; le plateau étant mis en communication avec une source électrique, soit directement, soit au moyen de la tige à boule $g\,b$, le fluide se répand sur toute sa surface, agit par influence, au travers du taffetas, sur les électricités naturelles du disque en bois qui doit communiquer au sol, et l'appareil se charge en raison de la tension de la source qui lui fournit du fluide. Ensuite on soulève le plateau perpendiculairement pour le séparer du taffetas, et pour reconnaître, par l'électroscope ou par la balance, l'espèce et la quantité de l'électricité qui le charge. Le taffetas est moins épais que le verre, mais aussi il est moins solide, d'où il résulte que ce condensateur prend toujours plus d'électricité que le précédent, et qu'il ne peut jamais résister à des charges aussi fortes; il est bon pour essayer le fluide des sources qui n'ont pas une grande tension.

Le condensateur à lames d'or (*Fig.* 87) n'est autre chose qu'un électroscope à lames d'or, sur lequel on adapte deux plateaux métalliques, minces et bien dressés; le supérieur $c\,c'$ est mobile et s'enlève par un manche isolant, l'inférieur $f\,f'$ est fixé à la garniture $g\,g'$ de la cloche $h\,h'$, et la lame non conductrice qui les sépare est disposée avec beaucoup d'art et de soin. Après avoir séparé les plateaux, on les enduit successivement, avec un pinceau, de plusieurs couches d'un vernis très-liquide formé par la dissolution de la gomme laque dans l'alcool; ce vernis sèche, et la pellicule qu'il forme est suffisante pour arrêter l'électricité; son épaisseur n'est pas de un dixième de millimètre. Ainsi les

plateaux sont presque en contact, et la dissimulation de l'électricité est aussi complète qu'il soit possible; à cet égard, le condensateur à lames d'or est le plus parfait que l'on connaisse; mais les couches minces de vernis n'offrant que très-peu de résistance, il ne peut supporter que les plus faibles charges. Par exemple, quand on a épuisé presque toute l'électricité des conducteurs de la machine, de manière qu'ils ne donnent plus aucun signe aux électroscopes les plus sensibles, si on les fait communiquer au plateau inférieur du condensateur, en mettant le plateau supérieur en communication avec le sol, et qu'après un instant on rompe les communications en *commençant* par celle du sol, puis qu'on enlève le plateau supérieur, on observera une grande divergence dans les lames; presque toute l'électricité qui restait aux conducteurs sera venue s'accumuler et se condenser dans le plateau inférieur. Cet appareil nous servira plus tard à une foule de recherches sur l'électricité, qui se développe soit par le simple contact des corps, soit par les actions chimiques auxquelles ils sont soumis. Pour les expériences délicates, il est bon de tenir la cloche du condensateur enveloppée d'une cage en verre, dans laquelle on dessèche l'air avec quelque corps absorbant.

377. *De la bouteille de Leyde, et des batteries électriques.* — Un vase en verre, revêtu à l'extérieur d'une feuille d'or ou d'étain montant jusqu'à quelques pouces des bords, et pareillement revêtu à l'intérieur, ou seulement rempli de quelques substances conductrices, d'eau, de grenaille de plomb, de feuilles d'or ou de clinquant, forme ce qu'on appelle une *bouteille de Leyde* (*Fig.* 88), ou une *jarre électrique* (*Fig.* 89); la tige $t\,b$ s'appelle *le bouton*, *le crochet* ou *l'intérieur* de la bouteille, parce qu'elle sert en effet à mettre la face intérieure en communication avec le sol ou avec les sources électriques. Tout l'espace compris entre le goulot $g\,g'$ et l'*armature extérieure* $a\,a'$ est verni avec beaucoup de soin.

Pour charger la bouteille, on la tient à la main par *la panse* ou par l'armature extérieure, et l'on met le bouton en communication avec les conducteurs de la machine, soit au contact, soit plutôt à une petite distance, afin de voir jaillir une foule d'étincelles qui se succèdent rapidement d'abord, puis qui se ralentissent de plus en plus, et qui indiquent ainsi le degré de la charge. L'électricité vitrée des conducteurs passe dans la bouteille, se répand sur toute la surface intérieure, et de là, agissant par influence à travers l'épaisseur du verre, elle décompose les électricités naturelles de l'armature extérieure, attire la résineuse, qui s'accumule et se condense sur la paroi de verre, et repousse la vitrée, qui s'écoule dans le sol par la main et par le corps, qui lui offrent un passage. On pourrait charger la bouteille en sens inverse, en tenant le crochet à la main, et en présentant la panse aux conducteurs; mais, dans tous les cas, la communication de l'une des faces avec le sol n'est pas moins essentielle que la communication de l'autre avec la machine. Quelquefois la bouteille se décharge spontanément avec beaucoup d'éclat: tantôt l'étincelle part entre le bouton et l'armature extérieure; alors on peut recommencer la charge: tantôt elle part à travers l'épaisseur du verre; alors la bouteille est percée et hors de service.

Quand la bouteille est chargée, on la pose avec précaution sur un isoloir, et l'on peut la décharger subitement avec l'excitateur (375), ou lentement, en tirant alternativement de la panse et du bouton une foule de petites étincelles.

L'électricité dissimulée ne reste pas sur les armatures intérieure et extérieure: elle les quitte pour s'attacher au verre, et se presser sur sa surface. C'est ce que l'on démontre au moyen de la bouteille à *armatures mobiles* (*Fig.* 90); après l'avoir chargée et posée sur un isoloir, on enlève l'intérieur, qui n'emporte avec lui que très-peu d'électricité; on enlève ensuite le verre, en laissant sur l'i-

soloir l'enveloppe extérieure, qui ne donne pareillement que de faibles signes électriques; mais les deux armatures ayant été touchées et remises à l'état naturel, si l'on rapporte le verre dans l'armature extérieure, et l'armature intérieure dans le verre, la bouteille ainsi recomposée a presque la même charge qu'elle avait primitivement, ce qui prouve d'une manière frappante que, dans la séparation des pièces, ces deux électricités étaient restées attachées à la surface du verre; on pourrait encore s'en assurer en étendant une main dans l'intérieur du verre, et l'autre à l'extérieur, lorsqu'on vient de le dépouiller de ses armatures, car on ne manquerait pas de recevoir ainsi une forte commotion.

Lorsqu'on présente à la bouteille plusieurs conducteurs pour la décharger, l'électricité choisit toujours le meilleur: ainsi, en pressant avec une main, une chaîne ou un fil de métal sur la panse, on peut impunément avec l'autre main apporter au bouton l'autre extrémité de la chaîne ou du fil, la décharge passe par le métal et jamais par le corps; cependant il est toujours bon de s'assurer d'avance qu'il n'y a pas de solution de continuité dans le métal, ou qu'il n'est pas trop mince pour laisser passer tout le fluide; car un fil excessivement fin ne suffirait pas pour détourner le coup.

On mesure la charge d'une bouteille par la distance à laquelle jaillit l'étincelle entre le bouton intérieur et un autre bouton communiquant avec l'intérieur (*Fig.* 92); la tige *tq* est divisée, on l'avance doucement au moyen de la vis *v*, et l'on observe la distance à laquelle l'étincelle est partie. Pour que les expériences fussent comparatives, il faudrait que, la boule B restant la même, tous les boutons des diverses bouteilles eussent les mêmes dimensions.

Nous rapporterons maintenant diverses expériences dont on pourra facilement se rendre compte au moyen de ce qui précède.

Dans *le carillon* de la figure 93 l'un des timbres commu-

nique à l'extérieur de la bouteille, et l'autre à l'intérieur; la petite balle de métal est suspendue par un fil isolant, les oscillations sont d'autant plus rapides que la distance des timbres est plus petites; par un temps sec, et pour de médiocres charges on en peut toujours compter plusieurs centaines.

L'araignée de Franklin, dont nous avons parlé (370) (*Fig.* 72), peut aller et venir entre les faces d'une bouteille ordinaires pendant plus d'un quart d'heure avant de l'avoir complètement déchargée.

Les figures de Leichtenberg semblent indiquer une différence essentielle entre les deux électricités résineuse et vitrée; on peut les obtenir avec un conducteur ordinaire communiquant à la machine, mais on les obtient plus belles et plus régulières au moyen de la bouteille de Leyde. Pour cela on prend une bouteille chargée et l'on trace des figures sur un gâteau de résine très-sec, d'abord avec le bouton, qui contient par exemple l'électricité vitrée, et ensuite avec la panse, qui contient l'électricité résineuse. Après cela, avec un soufflet qui contient un mélange de soufre et de minium très-bien pulvérisé, on souffle sur le gâteau de résine et l'on distingue alors les traces électriques que la bouteille a laissées sur la résine. Les traces vitrées deviennent jaunes et les résineuses deviennent rouges, parce que dans la poudre mélangée le soufre est électrisé résineusement et le minium vitreusement. Ces traces sont très-différentes : les jaunes sont comme *hérissées* en filets divergens, tandis que les rouges offrent partout des contours arrondis.

Le perce-carte (*Fig.* 100) offre un phénomène curieux; chaque pointe étant mise en communication avec l'une des faces de la bouteille, l'étincelle part et la carte est percée d'un trou plus grand qu'un trou d'épingle; des deux côtés, on observe autour du trou un petit bourrelet et des filamens tirés en dehors, comme si le fluide était parti du milieu de la carte pour sortir par ses deux faces. M. OErsted ex-

plique ce fait et beaucoup d'autres analogues, en supposant que l'électricité n'éprouve pas un mouvement de translation dans les corps, mais seulement un mouvement de vibration par lequel s'opèrent, autour de chaque molécule, des décompositions et recompositions successives; ainsi le fluide vitrée qui se présente au point *a* décompose les fluides naturels des molécules qu'il rencontre, attire le résineux avec lequel il se recombine par une étincelle, repousse le vitré, qui va à son tour décomposer les fluides naturels des molécules suivantes, attirer le résineux pour se recombiner avec lui par une nouvelle étincelle, et repousser le vitré; et ainsi de suite, de sorte qu'il y a autant d'étincelles que de molécules de matière pondérable: on peut rendre cette supposition sensible en faisant passer la décharge électrique par des grains de métal enfilés dans de la soie et séparés l'un de l'autre. Nous reviendrons plus tard sur cette importante théorie, qui semble confirmée par tous les faits de l'électricité chimique.

Le trou de la carte ne se fait pas à égale distance des deux pointes; mais, dans l'air ordinaire, il se fait toujours près de la pointe résineuse, et dans l'air raréfié sous la cloche de la machine pneumatique, il s'en éloigne pour se rapprocher de plus en plus de la pointe vitrée. Ce fait, constaté par M. Trémery, reste sans explication.

Pour percer le verre par la décharge électrique, on change un peu la disposition de l'appareil précédent, parce qu'il est alors nécessaire de mettre à l'extrémité de l'une des pointes une goutte d'un liquide conducteur, une goutte d'huile par exemple, qui touche immédiatement le verre dans une étendue un peu considérable. Le *perce-verre* est représenté dans la figure 101.

On enflamme les liqueurs spiritueuses avec la bouteille de Leyde plus sûrement qu'avec l'étincelle directe du conducteur de la machine. On peut même enflammer du coton roulé dans le lycopode ou dans la résine pulvérisée.

C'est au moyen de la bouteille de Leyde que l'on a essayé d'apprécier la vitesse avec laquelle le fluide électrique se transmet dans les corps. Des fils de métal isolés, dont l'ensemble forme une lieue, transmettent instantanément la décharge électrique; ces expériences furent faites en France et en Angleterre, de 1745 à 1750. A cette époque on essaya pareillement la transmission de l'électricité par l'eau et par le sol sec ou humide : en partant d'un point donné, un fil de métal de plusieurs centaines de toises de longueur, isolé sur des piquets de bois très-sec, s'en allait s'enfoncer dans le sol par son autre extrémité, après avoir traversé des rivières et des terrains de différentes natures; au point de départ, il était mis en communication avec l'une des faces de la bouteille; tandis que le sol était mis en communication avec l'autre face, les fluides ne pouvaient se joindre qu'après avoir traversé toute la longueur du fil métallique et toute l'étendue du sol et de l'eau, depuis la seconde extrémité du fil jusqu'au lieu de l'observation; et, malgré tant d'espace et tant d'obstacles, la décharge de la bouteille était instantanée, comme si elle eût été faite par l'excitateur ordinaire. Dans un point quelconque de cette longue chaîne, on pouvait enflammer des liqueurs spiritueuses, et c'était alors un spectacle fort étonnant de voir l'alcool s'enflammer par du feu qui venait de traverser une rivière.

La *commotion* de la bouteille de Leyde est assez forte pour être dangereuse; elle passe par les bras et la poitrine, lorsque, une main tenant la panse de la bouteille, l'autre en vient toucher le bouton. Alors les faibles charges se font sentir dans l'avant-bras seulement, les charges un peu plus fortes se font sentir au coude, et les charges plus fortes encore donnent une vive douleur à la poitrine. Pour faire passer la commotion entre deux points donnés du corps, il suffit d'établir des armatures sur ces deux points, c'est-à-dire des plaques de métal que l'on fait communiquer aux deux faces de la bouteille.

Lorsque plusieurs personnes forment *la chaîne* en se tenant par la main, si la première touche la panse de la bouteille et la dernière le bouton, tout le cercle reçoit instantanément la commotion; les personnes qui sont au milieu éprouvent un choc un peu moins vif que celles qui touchent la bouteille. On était autrefois fort curieux de savoir jusqu'où pouvait s'étendre cette puissance du choc électrique; et après l'avoir tenté sur des cercles nombreux, on l'essaya sur un régiment rangé en bataille, qui fut, dit-on, renversé d'un seul coup.

Les *batteries électriques* (*Fig.* 103) sont des réunions de plusieurs bouteilles de Leyde, ou de plusieurs jarres, dont tous les intérieurs communiquent au moyen des tiges de métal t, t', t'', et dont les extérieurs communiquent pareillement, parce que le fond de la caisse en bois B, B', sur lequel ils reposent, est une lame de plomb. Lorsqu'on veut charger ensemble plusieurs batteries, on fait communiquer tous les intérieurs entre eux et tous les extérieurs au sol; et pour juger le degré de charge, on emploie le petit électromètre à pendule (*Fig.* 91), qui s'ajuste sur les conducteurs de la machine; au commencement, et pendant les premiers tours du plateau, le pendule est presque au repos, parce que les batteries condensent tout le fluide qui se développe; mais peu à peu le pendule s'élève, et, par les divers angles d'écart qu'il prend, on juge des divers degrés de sa tension électrique, et par conséquent, des divers degrés de tension de l'intérieur des batteries, car celles-ci sont toujours dans le même rapport que les premières.

Une batterie peut se décharger comme la bouteille de Leyde, soit lentement, soit rapidement; mais il faut redoubler de précaution pour n'en pas recevoir le choc. L'épaisseur du verre des jarres et la tension de la machine restant les mêmes, la force d'une batterie peut être évaluée par l'étendue de la surface qui se charge; cent pieds carrés condensent cent fois plus d'électricité qu'un seul pied

carré, et il faut un homme fort robuste pour soutenir, sans danger, le choc d'un pied carré chargé par une machine ordinaire.

Nous allons indiquer quelques-uns des phénomènes les plus remarquables, que l'on peut produire au moyen de ces grandes accumulations d'électricité.

Tous les corps qui reçoivent le choc sont placés entre les deux branches *b* et *b'* de l'*excitateur universel*, qui est représenté dans la *figure* 104. L'une de ces branches communique avec l'extérieur de la batterie au moyen de la chaîne *C;* l'autre communique avec une chaîne *C'* qui se termine à la boule isolée *B;* lorsqu'on veut faire passer l'étincelle, on prend la boule *B* par l'extrémité de son manche isolant, on l'approche subitement de l'intérieur de la batterie : l'étincelle part et les fluides se recomposent dans tout le circuit *B*, *C' b' b C*.

Un fil de fer de plusieurs pouces de longueur étant mis entre les branches de l'excitateur, une faible décharge l'échauffe, une forte le fait rougir, une plus forte le fait jaillir en petits globules fondus, qui sont lancés au loin, et une plus forte encore le fait disparaître en vapeur. Avec une puissante machine, Van-Marum en a fondu cinquante pieds de longueur.

Une bande étroite de feuille d'étain, de trois ou quatre pouces de longueur, est volatilisée par une batterie ordinaire, la vapeur s'oxide, et forme de longs filamens flottans dans l'air, semblables à des toiles d'araignée.

Les autres métaux peuvent aussi s'échauffer, rougir, se fondre et s'oxider; mais en les prenant de même longueur et de même diamètre, des charges égales ne produisent pas sur tous les mêmes effets; ceux qui sont plus mauvais conducteurs, comme le platine et le fer, éprouvent, à égalité de dimensions, de plus grands effets de chaleur que l'or et le cuivre, qui sont les meilleurs conducteurs.

Les fils de soie dorés présentent un phénomène singu-

lier, qui montre avec quelle rapidité les molécules de matière conductrice sont saisies par le choc électrique : l'or qui les couvre est volatilisé et oxidé sans que la chaleur soit seulement capable de rompre la soie. Pour rendre cette expérience plus sensible, on appuie sur le fil une feuille de papier blanc, sur laquelle on voit, après le choc, une large trace de couleur brune. Par le même moyen, on peut enlever la dorure sur un livre ou sur une autre surface non conductrice, pourvu qu'elle n'ait pas trop d'étendue.

On se sert de cette propriété pour faire des *empreintes électriques* : *dcpr* (*Fig.* 94) est une *découpure* en papier, à laquelle sont collées deux bandes de feuilles d'étain *F*, *F'*; d'un côté, on la couvre d'une feuille d'or, qui touche l'étain par deux de ses bords; de l'autre, on la couvre d'un ruban de satin; et pour assurer le contact, on met tout ce système sous la *presse pp'* (*Fig.* 95). Les deux bandes d'étain étant mises en communication avec les deux faces de la batterie, l'étincelle part, l'or se volatilise, et, par tous les *jours* de la découpure, il passe sur le ruban, où il fait une empreinte de couleur brune très-régulière.

Les fortes charges font une impression remarquable sur les masses métalliques. Priestley a observé qu'elles en liquéfient la surface à l'endroit où elles les traversent; si le métal est peu fusible, on n'aperçoit, après le passage de l'étincelle, qu'un *cercle de fusion* d'une ou deux lignes de diamètre; mais s'il est très-fusible, comme le plomb, l'étain ou l'alliage de D'Arcet, on aperçoit autour du cercle central jusqu'à trois *anneaux de fusion*, d'une largeur sensible, concentriques, et séparés les uns des autres par des intervalles d'environ une ligne.

En répétant ces expériences curieuses, M. Fusinieri a constaté un autre fait, qui mérite toute l'attention des physiciens. C'est le *transport* des matières solides par le courant électrique (*Giornale di Fisica, Chimica*, etc., novem-

bre 1825); par exemple, en disposant un disque d'argent poli à égale distance, entre une boule d'or qui communique avec l'intérieur d'une petite batterie, et une boule d'argent qui communique avec l'extérieur, on observe après la décharge deux taches d'or parfaitement égales en diamètre et en intensité, sur les deux faces du disque d'argent. Les autres métaux sont pareillement transportés au travers de tout l'espace que peut franchir l'étincelle, et ils viennent, sur toutes les surfaces qu'ils rencontrent, se déposer en couches très-minces, tantôt à l'état d'oxide, tantôt à l'état métallique. M. Fusinieri a fait un grand nombre d'expériences intéressantes sur ce sujet; et il a observé que la matière pondérable qui est ainsi emportée et déposée par le courant électrique, paraît conserver une grande volatilité, car il arrive souvent que les taches qu'elle forme s'effacent avec le temps.

Quand l'étincelle passe dans un liquide, elle éclate et brille comme dans l'air; presque toujours le liquide est lancé de toutes parts avec une grande force.

Elle éclate de même dans la *poudre à tirer*, et en détermine l'explosion. L'on en peut faire l'expérience avec de petites cartouches de deux ou trois lignes de diamètre, et de quinze ou vingt lignes de longueur; deux fils de fer, traversant les bouts opposés de la cartouche, viennent aboutir vers son milieu, à une petite distance l'un de l'autre; c'est en franchissant leur intervalle que l'étincelle enflamme la poudre.

Dans les gaz l'étincelle produit une expansion si grande et si subite qu'elle peut lancer une petite balle au moyen du *mortier électrique*, qui est représenté *figure* 96. Kinnersley, qui observa le premier ce phénomène remarquable, inventa aussi un appareil pour en mesurer l'intensité. C'est un tube en verre, fermé et armé par ses deux bouts (*Fig.* 102). L'étincelle part entre les deux boules *bb'*; et un liquide qui s'élève en même temps dans le tube latéral

tt', donne la mesure de l'expansion. Cet appareil se nomme le *thermomètre de Kinnersley*.

Les mauvais conducteurs sont percés ou brisés par la décharge d'une forte batterie; une pierre plate, de plusieurs lignes d'épaisseur, est percée comme le verre mince; un cylindre de bois, de deux ou trois pouces de diamètre et d'un demi-pouce d'épaisseur, peut être fendu en éclats par une décharge qui passe dans le sens des fibres.

A la surface de quelques substances l'étincelle laisse une traînée lumineuse qui brille pendant plusieurs secondes et quelquefois pendant plus d'une minute; cette espèce de phosphorescence est rouge ou violacée sur la craie, verdâtre sur le sucre, sur certains spaths calcaires cristallisés et sur le grès de Fontainebleau.

Il ne faut pas des batteries très-fortes pour tuer des oiseaux, des lapins, et même des animaux de plus grande taille; ils tombent subitement, et l'observation anatomique n'a pu découvrir jusqu'à ce jour quels organes sont blessés; cependant, par les convulsions qu'ils éprouvent quand le choc est trop faible pour les foudroyer, on peut juger que le système nerveux est violemment attaqué.

378. *Les piles électriques* sont des espèces de batteries dont on ne charge que la première et la dernière face. La *figure* 97 représente une série de bouteilles de Leyde, tellement disposées, que l'extérieur de chacune communique avec l'intérieur de la suivante; l'intérieur de la première est en contact avec les conducteurs de la machine, et l'extérieur de la dernière en contact avec le sol. C'est ce qu'on appelle la charge par *cascade*. Un tel système forme une *pile* dont chaque bouteille est un *élément*; il se décharge en totalité lorsqu'on établit la communication entre les deux extrémités, l'étincelle est alors moins forte que s'il n'y avait qu'une seule bouteille; mais on peut aussi en décharger telle partie que l'on veut, ou même décharger chaque bouteille séparément. Si, après avoir isolé la pile, on cherche à re-

connaître sa tension électrique, on n'y trouve que du fluide vitré à un bout et du fluide résineux à l'autre; toutes les bouteilles ou *élémens* intermédiaires paraissent sensiblement à l'état naturel. Cependant, si l'on brise la pile, en détachant un, deux, trois ou quatre élémens, chaque partie détachée, chaque fragment, sera une pile complète, montrant aux deux bouts les deux fluides contraires, et n'ayant au milieu aucune électricité sensible. Cette disposition des fluides est, comme on voit, tout-à-fait analogue à la disposition des fluides magnétiques. On peut construire une pile avec des carreaux de verre armés sur les deux faces, et communiquant entre eux par des bandes de feuille d'étain. La *figure* 105 représente une pile de cette espèce.

CHAPITRE V.

De la Lumière électrique.

379. *Conditions générales pour que l'électricité donne de la lumière.*— Les plus grandes charges électriques accumulées sur les corps, soit directement, soit par dissimulation, ne donnent jamais aucune apparence lumineuse quand l'équilibre est établi et que le fluide est en repos. Ainsi, la première condition de la lumière électrique est le mouvement des fluides ou la rupture de leur équilibre. Cette condition, toujours nécessaire, n'est pas toujours suffisante; il faut encore que la tension des fluides qui détermine leur mouvement soit une force assez considérable. Par exemple, l'électricité d'une machine ordinaire ne donne point de lumière sensible quand elle s'écoule dans le sol par un fil de métal; tandis qu'une machine puissante peut environner d'une auréole brillante un fil de fer de cinquante pieds de long, communiquant au sol aussi parfaitement qu'il soit possible (Van-Marum, *Description de la grande machine du musée de Teyler*). La tension nécessaire à la production de la lumière est tout-à-fait dépendante de l'état, de la forme et de la conductibilité du milieu dans lequel les fluides électriques doivent se mouvoir : quelquefois de faibles tensions donnent une lumière éclatante; d'autres fois, les plus fortes tensions que l'on puisse accumuler ne donnent pas la moindre apparence lumineuse.

380. *Lumière électrique dans l'air et dans les gaz sous la pression de l'atmosphère.* — La distance à laquelle on

peut tirer l'étincelle d'un corps électrisé dépend surtout de la conductibilité de sa substance, de l'étendue de sa surface et de l'épaisseur de la couche électrique dont il est chargé; car la seule condition pour que l'étincelle parte, est que la tension de l'électricité puisse vaincre la pression de l'air. Dans les corps à formes anguleuses, cette condition se trouve remplie, même pour des charges assez faibles (366), et le fluide se dissipe spontanément, en formant des *aigrettes* de lumière, qui brillent dans les ténèbres, et dont les traits divergens ont quelquefois plusieurs pouces de longueur. Dans les corps à formes arrondies, il faut de très-puissantes charges pour que l'étincelle parte d'elle-même; mais si on leur présente un conducteur communiquant au sol, il s'exerce à l'instant une action par influence : les fluides se déplacent en vertu de la conductibilité, s'accumulent en raison de l'étendue des surfaces, et l'étincelle jaillit dès que la pression de l'air est vaincue sur l'un ou l'autre des corps qui sont mis en présence. Une machine est très-forte quand elle peut, sans le secours des conducteurs secondaires, donner des étincelles à vingt ou trente pouces. A cette distance, la lumière électrique forme un sillon de feu dont les sinuosités sont tout-à-fait analogues aux zigzags de l'éclair.

Pour multiplier les étincelles que donne une machine, il suffit de multiplier les solutions de continuité du conducteur, par lequel le fluide s'écoule dans le sol. C'est sur ce principe que reposent tous les jeux de la lumière électrique.

Avec des *grains* de métal, enfilés dans de la soie, et maintenus par des nœuds à quelques millimètres de distance, on peut composer des chaînes, des guirlandes ou des dessins qui paraissent resplendissans de feu pendant tout le temps que l'on tourne la machine avec laquelle ils communiquent. Entre le dernier grain et l'avant-dernier la lumière parait au même instant qu'entre le premier et le second,

tant est rapide la communication de l'électricité dans toute la longueur de la chaîne.

Les *tubes étincelans* (*Fig.* 99) se composent avec de petits losanges de feuilles d'étain (*Fig.* 98), que l'on colle sur le verre, en approchant leurs pointes à de très-petites distances l'une de l'autre; l'étincelle jaillit au même instant, entre tous ces losanges, et le tube paraît illuminé dans toute sa longueur.

Les *carreaux étincelans* offrent à l'œil des dessins plus fins et plus variés : on les forme en collant sur un carreau de verre ordinaire de petites bandes de feuille d'étain, *bb'*, *cc'*, etc. (*Fig.* 107), qui forment un ruban continu, depuis A jusqu'en B; ensuite on enlève, avec une pointe, toutes les parties de ces bandes qui se trouvent sur les contours du dessin que l'on veut rendre visible. Chacune de ces solutions de continuité est marquée par une étincelle lorsqu'on fait passer le fluide de la machine de B en A, ou de A en B. On peut de cette manière représenter avec assez de vérité des figures de toute espèce; c'était le grand amusement des électriciens du siècle dernier.

Le *carreau magique* est autrement disposé; l'une de ses faces est recouverte d'une feuille d'étain, et l'autre d'une espèce de vernis contenant beaucoup d'*aventurine*; l'électricité s'accumule par dissimulation; quand l'étincelle part, on voit sur la face aventurinée des traits de feu qui serpentent dans tous les sens.

C'est aussi dans l'obscurité qu'il faut étudier les phénomènes des pointes : alors, quand on les met en communication avec les conducteurs d'une forte machine, on aperçoit de brillantes aigrettes, comme celle qui est représentée dans la *figure* 106. A l'extrémité de la pointe on ne distingue qu'un seul trait de feu, qui se divise à une petite distance et se ramifie en une foule de petits filets étincelans.

L'électricité résineuse ne donne jamais des aigrettes aussi divergentes et aussi allongées que l'électricité vitrée;

ce phénomène singulier est bien digne d'attention, puisqu'il semble offrir un caractère distinctif entre les deux fluides électriques.

Les pointes qui sont en communication avec le sol donnent aussi des aigrettes, même quand elles se trouvent à plusieurs pieds de distance des corps électrisés.

En tirant des étincelles un peu fortes sur un morceau de drap ou de soie couvert de poussière métallique, ou frotté avec des feuilles minces d'or ou d'argent, on observe des effets analogues à ceux du carreau magique. La lumière paraît en mille endroits à la fois, et se ramifie dans tous les sens sur l'étendue de sa surface.

Des pointes de corps conducteurs encore plus fines et plus rapprochées donnent une espèce de *phosphorescence* continue ; par exemple, les lames d'or très-minces, collées sur du verre, du cuir ou du bois, paraissent illuminées pendant tout le temps que l'électricité les traverse, et sur certains corps mauvais conducteurs, la phosphorescence se prolonge pendant plusieurs minutes après le passage du fluide.

Ces apparences lumineuses que nous offre l'électricité des machines sont une imitation très-faible, et cependant très-exacte de plusieurs phénomènes qu'on observe dans le ciel et sur la terre au moment des orages. Elles nous serviront de principes pour expliquer, dans la Météorologie, toutes les formes de la lumière électrique, telles que l'éclair, les langues de feu qui paraissent au sommet des mâts ou sur les flèches des tours élevées, et une foule d'autres météores qui étaient, pour les anciens, un sujet d'effroi et de superstition.

381. *Lumière électrique dans le vide, dans les vapeurs et dans les gaz raréfiés.* — Un tube de huit ou dix pieds de longueur, dans lequel on a fait le vide, étant mis par l'une de ses extrémités en communication avec une machine ordinaire, et par l'autre en communication avec le

sol, on aperçoit tout son volume intérieur éclairé d'une vive lumière. L'électricité, ne trouvant plus qu'une faible résistance dans l'air qui reste, se dissipe au large dans toute la capacité du tube, et s'écoule en marquant partout son passage par des traits de feu. Quand les communications sont bien établies, la lumière paraît fixe et uniforme ; mais si à l'extérieur du tube on approche un corps conducteur, elle se porte vers lui, et en même temps elle prend plus d'éclat. Il arrive presque toujours qu'un tube qui a servi à ces expériences donne encore des espèces d'éclairs long-temps après avoir été séparé de la machine.

Pour observer les diverses apparences de la lumière électrique suivant les différens degrés de raréfaction de l'air, on emploie l'appareil qui est représenté dans la figure 108 ; c'est un vase en verre de forme ellipsoïde que l'on appelait autrefois *l'œuf philosophique* ; à l'une de ses extrémités il porte un tube à robinet, et à l'autre une tige à bouton, passant dans une boîte à cuir. Quand le vide est fait, aussi parfaitement qu'il soit possible, l'électricité passe librement en remplissant de lumière toute la capacité du vase ; quand on laisse rentrer un peu d'air, la lumière devient moins diffuse, elle se resserre, et forme entre les deux boutons b et b' des arcs de couleur pourpre ; une quantité d'air un peu plus grande donne encore moins de diffusion à la lumière, et ainsi de suite jusqu'au moment où le fluide ne peut plus s'écouler qu'en jaillissant d'un bouton à l'autre sous forme d'étincelles.

Comme avec les meilleures machines nous ne pouvons faire le vide qu'à deux millimètres, il reste encore dans les expériences précédentes, une quantité d'air qui peut avoir une grande influence et sur la formation de la lumière et sur sa couleur. Le vide barométrique étant le plus parfait que nous puissions obtenir, il est curieux de voir si le passage de l'électricité au travers des vapeurs si rares du mercure produirait encore des phénomènes lumineux.

Dès 1660, Picard avait remarqué qu'un baromètre devient lumineux lorsqu'on l'agite dans les ténèbres; plus tard on a constaté que ce phénomène est dû à l'électricité qui se développe par le frottement du mercure contre les parois intérieures du tube; enfin Cavendish imagina de faire un *double baromètre*, de manière que l'électricité donnée à l'une des cuvettes fût obligée de traverser le vide pour aller sortir par l'autre cuvette, et s'écouler dans le sol. Dans ce vide, plus parfait que les précédens, la matière électrique offre encore les mêmes phénomènes: elle remplit de lumière tout l'espace qu'elle traverse, et l'on reconnaît que des tensions même très-faibles sont suffisantes pour la faire passer du sommet de la première colonne au sommet de la seconde.

Les couleurs de la lumière électrique sont très-changeantes, et les changemens qu'elle présente sont dépendans de la force de l'étincelle, et de la pression du gaz qu'elle traverse; cependant pour la même force et la même pression, il y a des gaz et des vapeurs qui semblent donner de préférence les teintes rougeâtres, tandis que d'autres donnent les teintes jaunes, bleues ou violacées.

382. *Causes de la lumière électrique.* — Quelques auteurs ont pensé que le fluide électrique, en s'ouvrant de force un passage au travers des corps, les comprimait au point de les rendre lumineux; ainsi, d'après cette hypothèse, les vapeurs de mercure dans le vide barométrique seraient elles-mêmes comprimées et refoulées avec tant de violence, qu'elles dégageraient de la chaleur et de la lumière. Il n'y a point de faits positifs pour démontrer la fausseté de cette opinion, ni même son insuffisance.

Cependant il y a une autre supposition qui est aujourd'hui plus généralement admise, et qui nous semble plus vraisemblable; elle paraît avoir été faite, pour la première fois, par Ritter, et elle a été depuis développée par un grand nombre de savans, surtout par MM. Davy, OErsted et

Berzélius. Elle consiste à regarder tous les atomes de la matière pondérable comme les élémens entre lesquels s'accomplissent toutes les décompositions et toutes les recompositions électriques; les atomes posséderaient primitivement l'un des fluides; les uns, que l'on appelle *électro-positifs*, posséderaient primitivement le fluide positif ou vitré; les autres, que l'on appelle *électro-négatifs*, posséderaient primitivement le fluide négatif ou résineux : les premiers, enveloppés de fluide neutre, auraient attiré du fluide négatif, tandis que les derniers, au contraire, auraient attiré du fluide positif, de telle sorte qu'ils seraient l'un et l'autre à l'état naturel. Cela posé, imaginons une seule file d'atomes électro-positifs ou électro-négatifs, et l'un des fluides qui se présente pour la parcourir; il est évident qu'il se manifestera subitement autant de petites étincelles qu'il y a d'atomes, à peu près comme il arrive à la chaîne des grains de métal dont nous avons parlé; pour plusieurs files d'atomes, le phénomène serait le même, et dans le vide du double baromètre, les atomes dispersés de la vapeur de mercure seraient la vraie cause de la lumière qu'on observe. Enfin, dans le vide absolu, on ne sait ce qui arriverait, car le fluide neutre étant homogène et sans solutions de continuité, on ne peut rien dire des effets qu'il éprouve, puisqu'on ne sait rien sur le mode d'agrégation des deux fluides qui le constituent.

Bien que cette hypothèse semble appuyée par tous les faits connus, il est bon cependant de la mettre à de nouvelles épreuves, et de la regarder plutôt comme un moyen de chercher la vérité, que comme la vérité elle-même.

CHAPITRE VI.

Du mouvement des Corps électrisés.

383. Toutes les expériences précédentes nous conduisent à regarder la matière électrique comme un fluide subtil enveloppant les atomes des corps, et remplissant peut-être les intervalles plus ou moins grands qui existent entre eux. Ce fluide, dans son état neutre, exerce sans doute quelque action sur lui-même ; mais jusqu'à présent les effets qui en résultent nous restent complètement inconnus ; c'est seulement quand il est décomposé, qu'il se manifeste à nous par des phénomènes particuliers. Alors il exerce une action sur la matière pondérable, il lui imprime des mouvemens variés, et l'on croirait d'abord qu'il la sollicite directement par des forces attractives ou répulsives. Cependant un examen plus attentif nous fait voir que, si les atomes de matière sont agités par les fluides électriques, ils ne peuvent l'être que par une action indirecte de pression ou d'impulsion. De telle sorte que les mouvemens des corps électrisés ne sont que des mouvemens secondaires, dans lesquels la matière n'est point une puissance, mais une simple résistance, recevant passivement toutes les directions que lui imprime le fluide électrique. Et il est curieux de voir comment des masses pondérables peuvent être déplacées et emportées par un fluide impondérable.

384. *Mouvement des corps non conducteurs électrisés.* — Il ne paraît pas qu'il existe aucune attraction à distance, ni même aucune affinité entre le fluide électrique et la sub-

stance des corps non conducteurs ; car tous ces corps perdent leur électricité dans le vide. D'après cela, si nous considérons deux balles de gomme laque, par exemple, chargées l'une et l'autre d'une même électricité et mises en présence, la seule force qui les sollicite, est la répulsion de toutes les molécules du fluide dont elles sont revêtues ; l'effet immédiat de cette force serait donc d'écarter ces molécules, et de les disperser de toutes parts, si elles pouvaient se mouvoir librement ; par exemple, si les deux balles étaient dans le vide, elles resteraient immobiles, tandis que leur électricité obéissant, à sa répulsion propre, se disséminerait jusqu'aux limites de l'espace ; mais, suspendues au milieu de l'air, qui est un mauvais conducteur, le fluide qui les couvre est arrêté dans tous les sens, ou plutôt, il trouve dans tous les sens une résistance à vaincre. Celles de ses molécules qui s'appuient sur l'air ne peuvent se mouvoir sans pousser l'air devant elles, et celles qui s'appuient sur la substance des balles de gomme laque ne peuvent se mouvoir non plus sans les pousser comme un obstacle qui s'oppose à leur marche. C'est par ce double effet que les balles sont mises en mouvement et écartées l'une de l'autre.

Pour rendre le phénomène plus sensible, on pourrait concevoir que les balles de gomme laque, après avoir été électrisées, ont eu leur surface recouverte d'une couche de substance imperméable à l'électricité, de telle sorte que le fluide qui les charge soit comme emprisonné entre ces deux matières non conductrices. Alors il est évident que toutes les actions répulsives qui s'exercent entre les molécules électriques, se transmettent immédiatement aux molécules pondérables par le fait seul de la résistance passive qu'elles opposent. La couche d'air qui enveloppe les corps fait précisément l'office de cette couche imperméable à l'électricité.

On prouve, de la même manière, que les balles chargées de fluides contraires doivent être entraînées et attirées

par l'effort que font les molécules de ces fluides pour se rejoindre.

Le même raisonnement s'applique à tous les corps non conducteurs quelle que soit leur forme; et il est visible que, si un corps non conducteur, pris dans son état naturel, n'est jamais attiré ni repoussé par un corps électrisé, c'est simplement parce que ses fluides n'étant point décomposés par influence et séparés l'un de l'autre, il éprouve toujours deux actions contraires, l'une attractive, et l'autre répulsive, qui sont sans cesse égales et qui se détruisent.

385. *Mouvement des corps conducteurs électrisés.* — Nous avons vu (350) que, dans son état d'équilibre sur un corps conducteur, l'électricité forme une couche d'une certaine épaisseur, ayant deux surfaces, l'une qui s'appuie sur l'air environnant, et l'autre qui est libre dans la substance même du corps. Les molécules de la surface libre ne peuvent jamais, à elles seules, imprimer aucun mouvement à la matière pondérable, puisqu'elles ont la facilité de se déplacer dans toute la masse sans y éprouver aucune résistance sensible. Tous les mouvemens des corps conducteurs électrisés sont donc le résultat des diverses pressions que le fluide exerce contre l'air, ou, en général, contre les enveloppes imperméables qui limitent leurs surfaces; car on peut toujours assimiler l'air qui touche un corps conducteur à une enveloppe imperméable qui ferait corps avec lui. Cela posé, si l'on imagine des sphères conductrices, il est visible que, chargées d'une même électricité, elles se repoussent, surtout par les régions de leurs surfaces les plus éloignées l'une de l'autre; tandis que, chargées d'électricités contraires, elles s'attirent, surtout par les régions les plus voisines; ce n'est pas toutefois que les molécules de la surface libre n'aient aucune part au phénomène, car elles sont maintenues au lieu qu'elles occupent par des forces ou des répulsions contraires, qui prennent leur appui contre la couche d'air environnante.

Un corps conducteur, à l'état naturel, est toujours attiré par un corps électrisé, parce que ses fluides étant séparés par influence, et celui de nom contraire étant toujours appelé dans la région la plus voisine, l'attraction qui s'exerce sur lui est toujours plus efficace que la répulsion qui s'exerce sur l'autre à une distance plus grande.

386. *Mouvemens produits par l'écoulement de l'électricité.* — Sur un pivot conducteur *cp*, communiquant à la machine (*Fig.* 110), on pose en équilibre une petite tige de métal *tt'*, dont les deux bouts sont aiguisés et recourbés en sens contraire; et dès qu'on tourne la machine, cet appareil, que l'on appelle le *tourniquet électrique*, prend un mouvement de rotation très-rapide, comme si les extrémités des pointes étaient vivement repoussées. Le même phénomène se produit sur des tourniquets à plusieurs tiges (*Fig.* 112); et, lorsqu'on est dans les ténèbres, on observe, pendant le mouvement, des aigrettes de feu qui s'élancent de chaque pointe. L'électricité résineuse et la vitrée présentent une différence à l'égard de la lumière (380), mais elles n'en présentent aucune à l'égard du mouvement. Cette rotation curieuse s'explique de la manière suivante :

Le fluide électrique, répandu partout sur la surface des tiges du tourniquet, exerce partout une pression sur l'air environnant, comme l'eau et les autres fluides pondérables pressent, dans tous les points, les parois des vases qui les contiennent; si le fluide électrique ne trouvait point d'issue, les pressions opposées seraient toujours égales et l'appareil resterait au repos; mais dès qu'il s'écoule par une pointe, il n'exerce plus de pression sur l'orifice de l'écoulement, et la pression qui s'exerce au point opposé détermine le mouvement par un véritable *recul*, tout-à-fait pareil à celui qui s'exerce dans le tourniquet à gaz ou dans le tourniquet hydraulique.

387. *Mouvemens produits par une décomposition in-*

stantanée.—Concevons une sphère conductrice, de cuivre par exemple, communiquant au sol par un fil très-fin, et posée sur un plan non conducteur indéfini, où elle n'est retenue que par son poids ; imaginons qu'au dessus d'elle, à une certaine distance, on dispose un corps capable de recevoir ou de conserver les plus fortes charges électriques. Il est évident que, si la spère est très-petite, elle sera emportée par l'attraction qu'elle éprouve, et viendra de bas en haut, malgré son poids, se précipiter sur le corps qui la sollicite par influence ; mais il est évident aussi que, son diamètre et son poids augmentant, il arrivera une certaine limite où la puissance électrique sera tout-à-fait insuffisante pour la soulever ; l'étincelle partira entre elle et le corps électrisé qui la sollicite sans qu'elle en reçoive le moindre mouvement, à peu près comme l'étincelle part des conducteurs de la machine sans qu'ils soient entraînés et arrachés de leurs supports.

Cependant on observe des effets de la foudre qui semblent contraires à ce principe : on a vu souvent de grandes masses transportées à plusieurs centaines de pas, et surtout des pièces de métal arrachées de leurs scellemens par un effort équivalent à plusieurs milliers de kilogrammes. Ces phénomènes me paraissent dépendre d'une différence dans la décomposition des fluides naturels par des actions lentes ou par des actions subites. Dans le premier cas, la conductibilité suffit au déplacement des fluides, et ils ont le temps de se transporter et de s'arranger à la surface, où ils exercent contre l'air une pression qui est bientôt capable de le repousser ; dans le second cas, tous les atomes de la masse éprouvent, simultanément et subitement, une décomposition de leurs fluides naturels ; ils sont saisis avec tant de violence que l'arrangement voulu par les lois de l'équilibre n'a pas le temps de s'accomplir, et les masses sont ainsi entraînées par des forces incomparablement plus grandes que celles qui pourraient trouver leur point d'appui contre l'air.

CHAPITRE VII.

Des diverses causes qui développent de l'électricité.

388. Nous avons vu que deux surfaces quelconques s'électrisent par le frottement, l'une prenant le fluide vitré et l'autre le résineux; nous avons vu pareillement que la tension de l'électricité qui se développe dans ces circonstances, dépend de la nature des corps, de l'état de leur surface et de leur température; c'est sur ces principes que repose la construction des machines; et bien que nous puissions, par leur disposition présente, accumuler de grandes charges électriques en frottant des plateaux de verre poli contre des coussins de quelques pouces carrés d'étendue, il est probable que de nouvelles recherches sur ce point important nous fourniront des moyens encore plus efficaces d'activer la décomposition des fluides et par conséquent de produire des tensions plus fortes. Les théories qui expliquent si complètement la distribution des fluides électriques sur les corps, leur équilibre et leurs mouvemens, nous laissent dans une ignorance absolue sur les causes premières de leur séparation. Pourquoi le frottement donne-t-il naissance à l'électricité? c'est une question qu'aucune théorie ne peut résoudre. Ainsi, de nos jours, les physiciens sont réduits, comme autrefois, à faire des essais, et à tenter au hasard des expériences qui déterminent enfin quelques conditions précises de ce phénomène fondamental. L'énumération de toutes les causes qui développent de l'électricité est le seul secours que la science actuelle puisse offrir à

leurs recherches. L'électricité n'est pas seulement développée par le frottement, elle l'est encore par la pression, par la chaleur, par le contact et par les affinités moléculaires.

389. *Développement de l'électricité par pression.*—On pose un disque de métal sur un taffetas gommé; on le relève ensuite, au moyen d'un manche isolant, après l'avoir un peu pressé, et l'on trouve de l'électricité résineuse sur ce disque, et de la vitrée sur le taffetas. Cette expérience, que l'on doit à M. Libes, n'offre pas un caractère décisif. L'adhérence qui s'établit entre la surface du métal et la surface visqueuse du vernis produit un effet assez analogue au frottement. Mais M. Haüy est parvenu à développer de l'électricité dans un grand nombre de corps à surfaces lisses et polies, dans de telles circonstances, que le phénomène est bien certainement dû à la pression et non pas au frottement. Par exemple, un fragment de spath calcaire, à faces parallèles, étant pressé un instant entre les doigts, acquiert une charge très-sensible d'électricité vitrée; il en est de même de la topaze, de la chaux fluatée, du mica, de l'arragonite, du quartz et de plusieurs autres substances. Toutefois, l'espèce d'électricité qu'elles prennent dépend de la nature du corps qui les presse. M. Haüy a découvert en même temps une propriété très-curieuse des cristaux électriques par pression; c'est la faculté qu'ils ont de conserver leur électricité pendant plusieurs heures et quelquefois même pendant plusieurs jours. La chaux carbonatée est, sous ce rapport, la substance la plus remarquable; elle possède une telle *force conservatrice*, qu'après avoir été pressée un instant, elle donne encore, au bout de *onze* jours, des signes électriques sensibles (*Annales de Chimie*, tome 5). C'est sur cette propriété que repose la construction de l'aiguille électrique de M. Haüy, représentée dans la *figure* 111; elle ressemble à l'aiguille ordinaire, avec cette seule différence, qu'à l'une des extrémités, au

lieu d'un petit globule de métal, se trouve adaptée une petite lame de chaux carbonatée cc', que l'on électrise en la pressant entre les doigts ; cet électroscope, conservant très-bien sa force primitive, est un des plus simples et des plus commodes pour comparer approximativement les tensions électriques des différens corps qu'on lui présente. Ainsi, la faculté de développer de l'électricité par une pression donnée, celle de prendre tel ou tel fluide, et celle de le conserver plus ou moins long-temps, sont autant de caractères qui peuvent servir à distinguer et à classer les cristaux.

390. *Des électricités produites par la chaleur.* — La tourmaline a la propriété d'attirer et de repousser les corps légers : dans les Indes, et surtout à Ceylan, où cette pierre est très-commune, on s'amuse de cette propriété depuis bien des siècles, à peu près comme au temps de Platon les Grecs s'amusaient des attractions de l'aimant. Un phénomène aussi curieux ne pouvait échapper à l'attention des voyageurs ou même des commerçans. Les Hollandais firent connaître les tourmalines en Europe, et depuis une centaine d'années les propriétés électriques dont elles jouissent exercent la sagacité des physiciens. Voici les résultats généraux qui ont été découverts et constatés par Canton, Wilson, Priestley, Bergmann, Æpinus et Haüy. Toutes les tourmalines qu'ils employaient dans leurs expériences avaient une forme cylindrique ou prismatique plus ou moins allongée : l'*axe de cristallisation* est l'axe du prisme ou du cylindre.

1°. Quand une tourmaline est électrique, elle présente toujours vers les extrémités de son axe deux *pôles contraires*, l'un agissant par du fluide vitré, et l'autre par du fluide résineux ; sa région moyenne ne donne aucun signe d'électricité. Les fluides électriques qui se développent dans la tourmaline sont donc distribués à peu près comme les fluides magnétiques, qui deviennent libres dans un aimant cylindrique ou prismatique.

2°. Une tourmaline étant brisée transversalement pendant qu'elle est électrique, chacun de ses fragmens offre deux pôles, disposés dans le même sens que les pôles primitifs; autre analogie remarquable entre le fluide électrique des tourmalines et le fluide magnétique des aimans.

Il était nécessaire d'énoncer ces deux lois générales de la distribution des fluides dans les tourmalines, pour comprendre les conditions du développement de l'électricité et les singularités qu'elles présentent.

3°. Pour chaque tourmaline, il y a deux limites de température entre lesquelles sont compris tous les phénomènes électriques; au dessus de la limite supérieure et au dessous de la limite inférieure, la tourmaline se comporte comme les autres corps et ne manifeste plus d'*électricité polaire*. Ces limites paraissent être souvent 10° et 150°; elles sont en général peu différentes pour des tourmalines de même dimension, mais elles peuvent varier beaucoup avec la longueur.

4°. Entre ces limites, quand on chauffe une tourmaline régulièrement, c'est-à-dire de manière qu'elle éprouve à peu près les mêmes accroissemens de chaleur sur tous les points de sa surface, ses pôles électriques commencent à paraître, le vitré à un bout, le résineux à l'autre, et ils restent ainsi pendant tout le temps que la température *change* et *s'élève*.

5°. Une tourmaline ayant ses pôles par échauffement, si on la refroidit régulièrement, ses pôles disparaissent un instant pour reparaître ensuite, mais en changeant de position, le vitré prenant la place du résineux *et vice versâ*, et ces pôles, par *refroidissement*, inverses des premiers, se maintiennent pendant tout le temps que la température *change* et *s'abaisse*.

6°. La vertu polaire semble dépendre du *changement* de température, de telle sorte qu'à une température donnée, une tourmaline peut se présenter dans trois états différens,

savoir : à l'état naturel si elle a été maintenue long-temps à cette température; avec ses pôles par échauffement si elle y arrive en s'échauffant; avec ses pôles par refroidissement si elle y arrive en se refroidissant.

7°. M. Haüy a quelquefois remarqué un renversement des pôles pendant l'élévation de température, et un renversement contraire pendant le refroidissement; ce phénomène, qui ne se produit pas toujours, pourrait dépendre d'une différence de température entre les couches de la surface et les couches centrales.

8°. Une tourmaline, chauffée ou refroidie par une de ses extrémités seulement, paraît pendant quelques instans ne posséder qu'une seule électricité dans toute sa longueur; mais comme on voit toujours les deux électricités se développer en même temps, dans tous les autres phénomènes électriques, quels qu'ils soient, il est naturel de supposer que, dans ce cas, exceptionnel en apparence, les deux fluides s'y trouvent encore, inégalement distribués dans la longueur ou dans l'épaisseur de la tourmaline, et par conséquent inégalement perceptibles.

Pour vérifier toutes ces lois de l'électricité de la tourmaline, quelques observateurs, comme Priestley, la faisaient chauffer et refroidir pendant qu'elle était suspendue à un fil de cocon, et M. Haüy la posait sur un petit appareil représenté dans la *figure* 109.

Il existe un grand nombre de cristaux qui offrent des propriétés électriques analogues à celles de la tourmaline; nous les avons rassemblés dans le tableau suivant : ceux qui sont marqués de la lettre H ont été étudiés ou découverts par M. Haüy; les autres, beaucoup moins énergiques, ont été découverts plus récemment par le docteur Brewster (*Edinburgh journal of science*, n° 2, octobre 1824, pag. 208). En même temps, nous avons ajouté la composition minéralogique de ces cristaux, d'après M. Beudant.

Tableau des cristaux électriques par la chaleur.

1 Diamant.
2 Soufre.
3 Zinc oxidé (H).
4 Quartz.

5 Carbonate de chaux.	Acide carbonique. . .	44		
	Chaux.	56		
6 Carbonate de plomb.	Acide carbonique. . .	16		
	Oxide de plomb. . . .	84		
7 Sulfate de baryte. . . .	Acide sulfurique. . . .	34		
	Baryte.	66		
8 Sulfate de strontiane .	Acide sulfurique. . . .	44		
	Strontiane.	56		
9 Magnésie boratée (H) .	Acide borique.	68		
	Magnésie.	32		
10 Chaux fluatée.	Acide fluorique. . . .	28		
	Chaux.	72		
11 Sulfure d'arsenic. . . .	Soufre.	39		
	Arsenic	61		
12 Scolézite.	Silicate d'alumine. . .	49	Silice	48
	Tri-silicate de chaux.	38	Alumine.	25
	Eau.	13	Chaux.	14
			Eau.	13
13 Mésotype (H).	Bi-silicate d'alumine.	51	Silice.	49
	Tri-silicate de plomb.	40	Alumine.	26
	Eau.	9	Soude.	16
			Eau.	9
14 Mésolite	Mélange de scolézite et de mésotype.			
15 Analcime.	Bi-silicate d'alumine.	62	Silice.	55
	Bi-silicate de soude. .	27	Alumine.	21
	Eau.	11	Soude.	13
			Eau.	11
16 Prehnite (H).	Silicate d'alumine. . .	52	Silice.	50
	Bi-silicate de chaux. .	48	Alumine.	25
			Chaux.	25
17 Axinite.	Silicate d'alumine. . .	35	Silice.	51
	Bi-silicate de chaux. .	65	Alumine.	18
			Chaux.	31
18 Grenat.	Silicate d'alumine.. .	39	Silice.	38
	Silicate de fer.. . . .	61	Alumine.	20
			Bi-oxide de fer. . . .	42
19 Diopside.	Bi-silicate de chaux. .	53	Silice	57
	Bi-silicate de magnésie.	47	Chaux.	25
			Magnésie.	18
20 Émeraude	Bi-silicate d'alumine.	52	Silice.	68
	Quadri-silicate de glucine.	48	Alumine.	18
			Glucine.	14
21 Topaze.	Fluate tri-siliceux. . .	41	Acide fluorique. . . .	8
	Alumine.	59	Silice.	33
			Alumine.	59
22 Tourmaline (H). . . .	Silicate d'alumine. . .	90	Silice.	43
	Soude.	10	Alumine.	47
			Soude (1)..	10
23 Titane silicéo-calcaire ou sphène (H). . . .	Acide silicio-titanique.	81	Oxide de titane. . .	48
	Chaux.	19	Silice.	33
			Chaux.	19

(1) Quelquefois la soude est remplacée par la lithine.

24 Acide tartarique.
25 Acide citrique.
26 Tartrate de soude et de potasse.
27 Oxalate d'ammoniaque.
28 Oxi-muriate de potasse.
29 Sulfate de soude et de magnésie.
30 Sulfate d'ammoniaque.
31 Sulfate de fer.
32 Sulfate de magnésie.
33 Prussiate de potasse.
34 Acétate de plomb.
35 Carbonate de potasse.
36 Oxi-muriate de mercure.
37 Sucre (cristallisé).

Les conditions pour que les corps prennent l'électricité polaire semblent être une cristallisation régulière et une conductibilité imparfaite; car les forces, quelles qu'elles soient, qui déterminent la séparation des fluides, ne peuvent produire un résultat sensible, qu'en supposant qu'elles ne se détruisent pas l'une l'autre; ce qui arriverait infailliblement dans un état de conductibilité parfaite ou d'agrégation confuse. Aussi M. Haüy a-t-il trouvé des rapports remarquables entre la forme des cristaux et l'espèce d'électricité qu'ils montrent à chacune de leurs extrémités.

L'observation de M. Brewster, sur le diamant et le soufre natif, est très-importante, en ce qu'elle prouve que l'hétérogénéité des élémens constitutifs n'est pas une condition nécessaire de la séparation des fluides.

391. L'électricité qui se développe *au contact des corps* et dans les *actions chimiques* qu'ils exercent les uns sur les autres sera l'objet des chapitres suivans.

CHAPITRE VIII.

ÉLECTRICITÉ GALVANIQUE.

De l'Électricité développée au contact.

392. *Découverte du galvanisme.* — En 1789, Galvani, médecin et professeur à Bologne, observa un phénomène singulier : ayant eu l'occasion de préparer des grenouilles pour divers sujets de recherches, il les suspendit par hasard à un balcon de fer par de petits crochets de cuivre qui passaient entre les nerfs lombaires et la colonne dorsale; disposées ainsi, ces grenouilles, mortes et mutilées, éprouvaient de vives convulsions. Un observateur vulgaire aurait pu remarquer le fait, mais il en aurait facilement imaginé quelque explication spécieuse, et son esprit satisfait se serait occupé d'autre chose. Galvani fut moins prompt dans ses jugemens; doué d'une attention pénétrante et d'une rare sagacité, il saisit dans ce phénomène un principe nouveau, et en fit sortir cette branche féconde de la physique, qui est maintenant connue sous le nom de *galvanisme*. Il reconnut, d'abord, que les grenouilles, coupées, dépouillées et suspendues, comme nous l'avons dit, n'éprouvent pas des convulsions permanentes : pour que leurs membres s'agitent, il faut que le vent, ou quelque autre cause accidentelle, vienne mettre quelque point de leurs muscles en contact avec la tige de fer qui porte le crochet de cuivre. Cette condition est indispensable, et l'on peut s'en assurer par l'expérience : pour cela, on coupe une grenouille vivante, on la dépouille rapidement, et, passant la pointe des ciseaux sous les deux nerfs lom-

baires qui paraissent comme des fils blancs de chaque côté de la colonne vertébrale, on enlève, en deux coups, les deux ou trois vertèbres inférieures; ainsi, les nerfs lombaires sont mis à nu, et forment la seule attache qui lie encore les membres inférieurs aux vertèbres supérieures; un fil de cuivre, qui passe entre les deux nerfs et qui les touche, va s'accrocher à un fil de fer recourbé et assez long pour venir toucher les jointures ou les muscles. A chaque contact, les jambes se replient et s'agitent, et cette moitié d'une grenouille morte semble reprendre vie pour sauter. Ces effets peuvent se reproduire encore au bout de quelques heures; mais le plus souvent les convulsions s'affaiblissent assez promptement, et, après vingt ou trente minutes, on n'observe plus que de légères palpitations dans la fibre des muscles.

Voilà donc un fait régulier, constant et bien caractérisé, dont on connaît les conditions, et qui peut se reproduire à volonté; c'est en établissant ce point fondamental que Galvani a ouvert une nouvelle carrière, et distingué les commotions dont il s'agit de ces mouvemens vagues et convulsifs que l'on observe souvent dans les insectes, les reptiles et les poissons, long-temps après les diverses mutilations qu'on leur a fait subir. Préoccupé de quelque système sur un fluide nerveux ou sur un fluide vital, Galvani ne tarda pas à imaginer une explication du phénomène, qui fut en rapport avec ses idées du moment. Les commotions de la grenouille, dit-il, sont excitées par un fluide qui passe des nerfs aux muscles, au moyen de la communication extérieure que l'on établit entre eux; ce fluide existe dans les nerfs, il traverse l'arc conducteur, c'est-à-dire le crochet de cuivre et la tige de fer, et vient à l'instant du contact se précipiter sur les muscles, et les contracter à peu près comme ferait une décharge électrique.

L'explication est séduisante : elle fut accueillie avec transport, et le fluide nouveau fut appelé *fluide galvanique*.

Le bruit de cette découverte se répandit bientôt en Allemagne, en France et en Angleterre; partout on s'empressait de répéter, de varier les expériences; le phénomène lui-même excitait une grande admiration; mais l'espérance de saisir, dans les corps animés, un fluide subtil, un principe de vie, donnait encore une nouvelle ardeur à l'active curiosité des savans. D'ailleurs, ces idées paraissaient à une époque de grandes découvertes et de grandes réformes; tous les esprits étaient en mouvement et comme emportés par l'attrait de la nouveauté.

On reconnut d'abord une analogie remarquable entre le fluide galvanique et le fluide électrique; c'est qu'on n'obtient jamais de commotions dans les grenouilles, lorsqu'on établit la communication entre les nerfs et les muscles au moyen des corps mauvais conducteurs de l'électricité. Dès lors, il s'éleva une discussion parmi les physiciens; les uns soutenaient, avec Galvani, qu'une analogie n'est pas une identité, et que le fluide nouveau, bien qu'il ne pût traverser ni le verre ni la résine, n'en était pas moins un fluide vital, distinct des fluides qui se développent dans la nature inorganique; les autres étaient loin de supposer qu'un seul fait, commun entre deux causes, pût établir leur identité: mais ils demandaient qu'on leur montrât des effets galvaniques qui ne pussent être produits par l'électricité; ajoutant, avec raison, qu'une faible étincelle agit, comme le galvanisme, pour donner aux grenouilles de vives commotions. Malgré cette différence d'opinions, l'on s'accordait volontiers à regarder les corps vivans comme chargés d'un fluide électrique ou non électrique, et à les assimiler, en quelque sorte, à une bouteille de Leyde, les nerfs représentant l'intérieur de la bouteille et les muscles l'extérieur. En même temps, on poursuivait de toutes parts les expériences sur des animaux de toute espèce pour observer leur sensibilité galvanique et la variété des phénomènes qu'ils présentaient, lorsqu'on établissait la communication entre

leurs muscles et leurs nerfs au moyen d'un arc conducteur. Tous les corps vivans éprouvent, dans ces circonstances, des effets plus ou moins remarquables : souvent même il n'est pas nécessaire de dénuder ni les muscles ni les nerfs ; par exemple, une pièce de cuivre étant posée sur la langue et une pièce de fer dessous, on éprouve une saveur très-prononcée à l'instant où les deux pièces se touchent ; il se trouve des personnes assez sensibles pour voir en même temps une lueur passer devant leurs yeux.

Toute hypothèse est bonne quand elle fait faire des découvertes, et l'hypothèse de Galvani eut son moment de succès ; mais pour la rendre féconde, il fallait admettre des considérations vagues, des données incertaines ; il fallait se jeter dans des questions compliquées sur les fonctions vitales et sur les mystères de l'organisation ; ces questions, sans cesse agitées parmi les hommes, et toujours insolubles, commençaient à reprendre vogue ; les meilleurs esprits s'y laissaient entraîner ; et l'on ne sait combien de fausses routes auraient été ouvertes à l'esprit humain, ni avec quelle ardeur on s'y serait jeté, si un homme d'un génie hardi n'eût mis un terme à toutes ces vaines tentatives. Cet homme fut Volta. Déjà célèbre par plusieurs découvertes ingénieuses sur l'électricité, Volta, professeur à Pavie, répétait, avec une inquiète attention, toutes les expériences de Galvani et de ses disciples ; plein d'enthousiasme pour les faits, il ne donnait qu'une adhésion conditionnelle aux hypothèses ; enfin, il saisit, avec une admirable sagacité, une condition du phénomène dont l'importance avait échappé jusque-là aux plus habiles observateurs. Quand l'arc conducteur, qui établit la communication entre les muscles et les nerfs, est d'un seul métal, la contraction est toujours peu sensible ; au contraire, elle est toujours vive et forte quand l'arc conducteur est composé de deux métaux. L'expérience en est représentée dans la *figure* 113 : la partie ombrée de l'arc est en zinc, l'autre est en cuivre ; il importe que les

métaux soient nets et bien décapés au point où ils touchent la grenouille et surtout au point où ils se touchent entre eux. Cette condition posée, Volta en tire la conséquence suivante : Il est vrai, dit-il, qu'il y a du fluide en jeu dans cette expérience ; mais la grenouille n'est point une bouteille de Leyde ; le fluide qui l'agite n'est point dans ses muscles ni dans ses nerfs, il est dans les métaux ; il se développe par leur contact, et il n'est autre chose que du fluide électrique ordinaire. Une idée aussi contraire à tout ce que l'on connaissait alors sur les propriétés électriques et sur la conductibilité des métaux, ne pouvait être admise sans opposition ; il est vrai que l'hypothèse de Galvani était épuisée ; elle ne produisait plus de faits nouveaux, mais elle avait l'avantage d'expliquer tous les faits connus, et d'établir entre eux une liaison séduisante. Les opinions furent partagées. A quoi servent les deux métaux, disaient les partisans de Galvani, si ce n'est à établir une communication plus complète entre les muscles et les nerfs, et à donner au fluide un écoulement plus libre ? A quoi pourraient-ils servir, répondaient les partisans de Volta, s'il n'y avait qu'une communication à établir ; un seul métal ne serait-il pas suffisant ? Et, de part et d'autre, on tentait des expériences nouvelles, autant, peut-être, pour soutenir l'opinion qu'on avait adoptée que pour la mettre à l'épreuve ; car il y a aussi dans les discussions scientifiques une sorte de conviction prématurée, à laquelle on se laisse trop souvent entraîner. Galvani, sans nier l'efficacité des deux métaux, essayait de démontrer qu'un seul métal excite des contractions ; et, en effet, une grenouille, préparée et jetée sur un bain de mercure, éprouve des palpitations très-sensibles ; elle en éprouve pareillement lorsqu'on touche à la fois les muscles et les nerfs avec du plomb très-pur, ou avec un autre métal dans lequel l'analyse chimique ne découvre rien d'étranger. Loin de contester ces phénomènes, Volta les annonçait lui-même, et il en tirait des preuves à l'appui de son opinion. Il est

vrai qu'un seul métal agit; mais frottez-en l'extrémité sur un autre métal, il agira encore avec beaucoup plus d'énergie. Les parcelles imperceptibles qui s'y attachent lui donnent une hétérogénéité suffisante; c'est au contact du métal et de ces parcelles étrangères que l'électricité se développe. Ce qui est homogène pour l'analyse chimique n'est point homogène absolument; et, d'ailleurs, si l'art ou la nature pouvaient nous donner un métal d'une pureté parfaite, ce métal agirait encore; dès qu'il touche les muscles ou les nerfs, il y a hétérogénéité aux points du contact, et, par conséquent, de l'électricité produite. Enfin, la substance des muscles et celle des nerfs sont assez différentes entre elles pour donner de l'électricité quand elles se touchent; et, en effet, en repliant les muscles cruraux sur les nerfs lombaires, on obtient des palpitations sensibles, surtout si la grenouille est très-vive et très-rapidement préparée.

393. *Preuves directes du développement de l'électricité par le contact.* — L'idée du développement de l'électricité au contact des corps hétérogènes ne s'accréditait que lentement; la sévérité des théories physiques en réclamait des preuves encore plus directes et plus décisives, et Volta ne fut pas long-temps à les produire. Un appareil qu'il avait inventé quelques années auparavant lui en fournit les moyens; c'est le condensateur, que nous avons décrit (376), et qui est représenté *figure* 87.

L'expérience se fait de la manière suivante : Après s'être assuré que le condensateur garde bien le fluide qu'on lui donne, et après l'avoir remis à l'état naturel, on établit, avec les doigts mouillés, une communication entre son plateau supérieur et le sol; en même temps une plaque de zinc, communiquant pareillement au sol, est mise en contact avec le plateau inférieur; un seul instant suffit, on rompt les communiations, on enlève le disque supérieur, et l'on observe une divergence sensible dans les lames d'or. D'où vient cette électricité? Il est évident qu'elle n'a pu être

développée qu'au contact du cuivre avec la lame de zinc ; c'est là qu'une force particulière a exercé son action pour séparer les fluides naturels et pour les mettre en mouvement; le fluide vitré qu'elle a fait passer sur le zinc s'est écoulé dans le sol ; le fluide résineux qu'elle a poussé sur le cuivre du plateau inférieur s'y est accumulé par dissimulation, en agissant sur les fluides naturels du plateau supérieur; et, ce plateau étant enlevé, toute l'électricité résineuse, dissimulée dans le plateau inférieur, se répand librement, passe dans les lames, et produit la divergence qu'on y observe.

En substituant à la lame de zinc une lame de même métal que le plateau, nul effet n'est produit. Mais tous les autres métaux produisent une divergence dans les lames ; le plomb, l'étain, le fer, le bismuth et l'antimoine prennent, comme le zinc, l'électricité vitrée, et donnent au plateau une charge résineuse : tandis que l'or, l'argent, le palladium et le platine produisent un effet contraire ; ils prennent une charge résineuse, et donnent au cuivre du plateau une charge vitrée. Ces expériences sont décisives; mais elles ne donnent pas encore de la force qui développe l'électricité l'idée complète que l'on doit en avoir; car on pourrait supposer qu'elle agit seulement à l'instant du contact, et qu'elle dérive peut-être du frottement ou de la pression qui s'exerce alors entre les surfaces métalliques. Pour lever tous les doutes à cet égard, Volta eut l'ingénieuse idée de faire une *plaque double* (*Fig.* 118), dont les deux moitiés, l'une en zinc et l'autre en cuivre, se trouvent soudées à la jonction ss'. Or, en prenant à la main le zinc de cette plaque, et en touchant avec son cuivre le plateau inférieur du condensateur, tandis que le plateau supérieur communique au sol, on obtient la même divergence dans les lames que si le zinc eût immédiatement touché le cuivre du plateau. Donc, dans la plaque double, après des années de contact, la force agit encore entre le zinc et le cuivre, comme

si ces deux métaux venaient de se toucher à l'instant.

394. *De la force électromotrice.* — Cette force nouvelle, qui s'exerce entre les substances hétérogènes, est ce qu'on appelle la *force électromotrice;* elle naît du contact, elle réside à la surface de jonction, et là, elle agit pour décomposer l'électricité naturelle, séparant sans cesse les deux fluides, faisant passer le vitré sur l'un des corps et le résineux sur l'autre. Ainsi, la plaque double (*Fig.* 118) étant isolée, il est impossible qu'elle soit jamais à l'état naturel. Voici les principaux caractères de cette force :

Elle produit la décomposition des fluides naturels et empêche leur recomposition; par le premier effet, le fluide vitré est poussé sur le zinc, se disperse sur toute son étendue en vertu de sa répulsion propre, tandis que le fluide résineux est pareillement poussé et dispersé sur le cuivre; par le second effet, ces fluides contraires sont maintenus en présence, l'un à droite, l'autre à gauche de la surface de contact, sans pouvoir franchir cette surface et se recomposer en vertu de leur attraction mutuelle. Pour avoir une idée plus précise de cette résistance, on peut concevoir un moment qu'il n'y ait pas de décomposition au contact, et que l'on donne artificiellement un peu de fluide vitré au zinc; alors ce fluide ne passerait pas sur le cuivre, la force électromotrice serait comme un obstacle pour l'arrêter; si, au contraire, on donnait au zinc un peu de fluide résineux, il est probable que ce fluide passerait en *totalité* sur le cuivre : on aurait les phénomènes inverses en électrisant le cuivre, résineusement ou vitreusement.

Comme obstacle à la recomposition, la force électromotrice a une limite; c'est-à-dire qu'elle n'est pas capable d'arrêter des charges quelconques de fluide vitré sur le zinc, ou de fluide résineux sur le cuivre; dès que ces charges, acquises naturellement par le contact ou données artificiellement, atteignent une certaine tension, elles peuvent franchir la surface de jonction pour se répandre au

large ou pour se recombiner; mais, dans ce cas, la force électromotrice arrête encore tout ce qu'elle peut arrêter. On admet qu'en représentant, en général, par $+t$ la tension du fluide vitré qui se trouve sur le zinc, et par $-t'$ la tension du fluide résineux qui se trouve sur le cuivre, la différence $t+t'$ des deux tensions est une quantité constante, quelles que soient les charges de fluide vitré ou résineux. Si le cuivre était chargé de vitré comme le zinc, sa tension serait alors représentée par $+t'$, et la différence $t-t'$ serait encore la même. C'est cette différence des deux tensions que l'on appelle *tension maximum*, parce qu'elle est en effet le maximum de ce que la force électromotrice peut arrêter et retenir pour empêcher l'équilibre ordinaire.

Comme cause de décomposition, la force électromotrice est instantanée et permanente : permanente, parce qu'elle est toujours prête à agir dès que la tension n'est pas ce qu'elle doit être pour l'équilibre galvanique; et instantanée, parce qu'il ne lui faut qu'un instant inappréciable pour porter cette tension à son maximun. On reconnaît que cette tension est très-faible, parce qu'une lame de zinc ne charge pas le condensateur lorsqu'elle est isolée, tandis qu'elle le charge en un instant lorsqu'elle communique au sol.

Les tensions électriques, développées et retenues par la force électromotrice, ne sont pas les mêmes au contact de tous les corps. Les métaux sont bons *électromoteurs*, bien que l'on observe entre eux des différences très-marquées; et l'on dit, en général, que les autres substances ne sont point électromotrices, parce qu'en effet elles ne produisent au moyen du condensateur que des résultats insensibles: mais, lorsqu'on les éprouve avec des instrumens plus délicats, on reconnaît qu'elles développent aussi de l'électricité par le contact; seulement, les tensions qu'elles produisent sont incomparablement plus faibles que celles des métaux.

Ainsi, la force électromotrice découverte par Volta est une force universelle qui s'exerce au contact de toutes les molécules des substances hétérogènes, qui décompose sans cesse les fluides électriques, et qui donne naissance à des forces nouvelles, dont les effets se font sentir à la matière pondérable. Or, les élémens qui composent la terre, soit à sa surface, soit à diverses profondeurs, sont mêlés et confondus de telle sorte qu'il y a partout hétérogénéité entre les parcelles qui se touchent : combien de substances diverses sont mises en contact dans les plus petits des êtres organisés, et combien de réactions électriques s'y doivent développer ! La terre végétale, les pierres, les roches, les laves, les couches géologiques, sont-elles autre chose qu'une agrégation de principes différens, entre lesquels la force électromotrice doit agir aussi avec plus ou moins d'intensité ? On aperçoit, d'une seule vue, tout ce qu'il y a de fécond dans cette découverte, et nous verrons que les premiers observateurs n'ont pas été trompés dans leurs espérances, quand ils ont cru que les principes du galvanisme deviendraient la clef d'une foule de phénomènes.

CHAPITRE IX.

De la pile de Volta.

395. *Principes sur lesquels repose la construction de la pile.* — La pile se construit avec trois corps différens: deux sont métalliques et bons électromoteurs, et le troisième est non métallique, bon conducteur et très-faiblement électromoteur.

Les métaux qu'on emploie avec le plus d'avantage sont le zinc et le cuivre, le premier forme les *élémens positifs* de la pile, le deuxième les *élémens négatifs*; deux élémens réunis ou soudés ensemble, l'un positif et l'autre négatif, composent ce qu'on appelle *une paire* ou *un couple*.

Le corps non métallique est ce qu'on appelle le *conducteur*; tantôt c'est une *rondelle humide*, c'est-à-dire une rondelle de drap ou de carton imbibée d'eau pure ou de quelque dissolution acide, alcaline ou saline; tantôt c'est la dissolution elle-même; d'autres fois c'est un corps sec, et alors la pile est ce que l'on appelle une *pile sèche*.

Concevons une plaque de cuivre, ou un élément négatif, communiquant au sol par le fil conducteur non métallique représenté par *f* (*Fig.* 119). Sur sa surface supérieure posons une plaque de zinc de même dimension: à l'instant du contact, la force électromotrice exerce son action; le fluide résineux qu'elle développe passe sur le cuivre, et s'écoule dans le sol; le fluide vitré au contraire passe sur le zinc, et s'y accumule jusqu'à ce qu'il y ait acquis la tension maximum que la force électromotrice soit capable de

retenir; il ne faut pour cela qu'un moment inappréciable; cette tension, ou plutôt l'épaisseur électrique qui la produit, étant prise pour unité, nous dirons que le cuivre est à l'état naturel, tandis que le zinc est couvert d'une épaisseur 1 d'électricité vitrée. Si par quelque moyen nous allions enlever au zinc une partie du fluide qui le couvre, il n'aurait plus l'épaisseur 1 qu'il doit avoir; la force électromotrice le reproduirait à l'instant par un nouveau développement qui réparerait exactement la perte, et par un égal développement de résineux qui s'écoulerait dans le sol. A chaque portion de fluide que l'on viendrait de la sorte enlever au zinc, il y aurait une réparation subite pour reproduire sans cesse l'épaisseur 1, qui est l'état de l'équilibre galvanique; et si l'on établissait par exemple la communication du zinc avec le sol par un fil *non métallique*, son fluide vitré s'écoulerait sans cesse, et serait sans cesse réparé; en même temps le fluide résineux développé sur le cuivre s'écoulerait de même; tellement que, si l'on approchait l'un de l'autre les deux fils non métalliques qui touchent le zinc et le cuivre, les fluides se recomposeraient à leur point de contact, et l'on aurait *une circulation* électrique continue; les fluides seraient séparés au contact des métaux, et recomposés au contact des fils conducteurs non électromoteurs qui communiquent avec eux.

Cela posé, laissons le cuivre seulement communiquer au sol, et sur le zinc plaçons une rondelle humide. Il est évident qu'elle partagera l'électricité vitrée du zinc, mais que, la perte étant réparée à l'instant, l'épaisseur sera 1 sur la rondelle et sur le zinc, comme elle était d'abord.

Il en sera de même encore si nous posons une plaque de cuivre sur la rondelle humide, puisqu'il n'y a point de force électromotrice entre ces corps.

Mais si nous posons une deuxième plaque de zinc sur cette deuxième plaque de cuivre, le phénomène sera plus compliqué, et c'est ici que se montre le véritable principe

de l'accumulation de l'électricité dans la pile. Supposons pour un moment que l'action de la force électromotrice soit suspendue dans ce deuxième couple: alors il est évident que le zinc prendrait une épaisseur 1 de fluide vitré, comme l'a fait la rondelle humide et la plaque de cuivre, et dès que la force électromotrice agira, cette épaisseur deviendra égale à 2 sur ce 2e zinc, puisqu'elle doit toujours excéder de 1 celle du cuivre avec lequel il est en contact. En même temps le fluide résineux qui sera développé sur le cuivre sera détruit par le fluide vitré qui s'y trouve, et il se fera dans le premier couple un nouveau développement par lequel le 1er zinc sera ramené à une épaisseur 1, ainsi que la rondelle humide et le 2e cuivre. Au moyen de cet arrangement, le 2e zinc doit donc avoir pour son équilibre une épaisseur de fluide vitré double de celle qui se trouve sur le premier.

On voit que par le même principe la 2e rondelle humide et le 3e cuivre auront la même épaisseur 2, tandis que le 3e zinc aura une épaisseur 3. Le 4e zinc aura une épaisseur 4, le 5e une épaisseur 5, etc...., le 10e une épaisseur 10.... le 100e une épaisseur 100...., et le 1000e une épaisseur 1000.

Ainsi, rien ne limite l'épaisseur électrique que l'on peut accumuler au sommet d'une semblable pile, puisque rien ne limite le nombre des élémens que l'on peut superposer; et le 1er zinc étant, comme nous avons vu, une source inépuisable d'électricité vitrée dont l'épaisseur est 1, le 1000e zinc est une source inépuisable dont l'épaisseur se trouve égale à 1000. Telle est l'admirable invention au moyen de laquelle Volta est parvenu à développer et accumuler une épaisseur électrique indéfiniment croissante sans frottement ni pression, et par la seule puissance du contact de certains corps disposés dans un ordre déterminé. La pile que nous venons de construire est nommée *pile à colonne:* nous continuerons de nous en servir pour démontrer plusieurs

propriétés remarquables qui sont communes à toutes les piles dont nous verrons plus loin la construction.

396. *De la pile isolée.* — L'extrémité de la pile qui se termine par une plaque de zinc s'appelle *l'extrémité zinc*, *l'extrémité positive*, ou *le pole positif*: celle qui se termine par le cuivre s'appelle *l'extrémité cuivre*, *l'extrémité négative*, ou *le pôle négatif*. Dans la disposition dont nous venons de parler, le pôle négatif communiquait au sol, le pôle positif était isolé, et sur toute la pile il y avait du fluide vitré dont l'épaisseur allait croissant, depuis le 1er zinc où elle était 1, jusqu'au 100e zinc où elle était 100, en supposant que la pile eût 100 couples. Concevons une autre pile toute pareille, avec cette seule différence que le pôle positif communique au sol, tandis que le pôle négatif reste isolé, il est évident qu'il y aura partout du fluide résineux dont l'épaisseur ira croissant, depuis le 1er cuivre (c'est-à-dire celui qui touche le zinc communiquant au sol) où elle sera 1, jusqu'au 100e cuivre où elle sera 100. Et si maintenant nous mettons ces deux piles bout à bout, en interposant seulement une rondelle humide entre les deux pôles qui communiquaient au sol, nous n'aurons qu'une seule pile de 200 couples, dont chaque moitié conservera l'équilibre électrique qu'elle avait d'abord : ainsi le milieu sera à l'état naturel, même après avoir supprimé les fils de communication; à partir de là on aura d'un côté de l'électricité vitrée, de l'autre de l'électricité résineuse; ces électricités ne pourront pas se rejoindre, et leurs épaisseurs, toujours croissantes par différences égales pour chaque couple, seront 100 à chaque pôle. Si l'on vient ensuite à troubler cet équilibre en prenant de l'électricité à l'un des pôles, le *zéro*, ou le point qui est à l'état naturel, se déplacera pour un instant; le pôle touché aura une épaisseur moindre que 100, et l'autre une épaisseur plus grande; mais bientôt, la perte par l'air diminuant plus rapidement l'épaisseur électrique du pôle le plus fort, le zéro reviendra

au milieu, et l'équilibre sera rétabli. Ainsi dans toute pile isolée l'arrangement définitif de l'électricité est tel que le milieu est à l'état naturel, tandis que les deux moitiés sont chargées de fluides contraires, l'épaisseur de ces fluides augmentant de 1, en passant d'un couple au suivant.

397. *De la pile en activité.* — Les pôles de la pile isolée étant des sources *indéfinies* d'électricités contraires, il est évident que, si l'on met chacun d'eux en communication avec un fil de métal, le fil partagera le fluide du pôle qu'il touche, et l'on aura ainsi deux conducteurs, l'un positif, l'autre négatif, qui étant mis en présence devront donner une recomposition *continuelle*. C'est en effet ce que représente la *figure* 114; les deux fils (que l'on nomme aussi quelquefois les deux pôles de la pile) étant approchés à une petite distance, on voit jaillir une étincelle, une autre la suit de près, puis une autre, et ainsi de suite; c'est un courant de feu continu, c'est une batterie inépuisable qui se décharge toujours sans être jamais déchargée.

Lorsqu'on met les fils conducteurs en contact immédiat, et que l'on ferme ainsi le circuit de la pile, les étincelles disparaissent, mais tous les effets électriques ne sont pas détruits. Les fluides se développent encore dans tous les couples, entre tous les élémens, et ne cessent de venir se recomposer dans tous les points des fils conducteurs qui rejoignent les deux pôles de la pile. Ainsi au dehors tout paraît immobile, et au dedans tout est en activité et en mouvement. Une des preuves les plus frappantes de cette rapide circulation de l'électricité est le phénomène que présente un fil métallique un peu fin, que l'on interpose entre les conducteurs, pour fermer le circuit : si ce fil est un peu long, il devient chaud subitement; un peu plus court, il devient rouge, et plus court encore, il devient rouge-blanc, alors, suivant la nature du métal, il entre en fusion et tombe en gouttes, brûle avec éclat, ou reste inal-

térable, persistant dans cet état d'incandescence pendant tout le temps que la pile est en activité.

L'eau, les acides, les oxides, les sels et tous les corps, pour peu qu'ils soient conducteurs, éprouvent des effets remarquables lorsqu'on les place dans le *courant* de la pile, c'est-à-dire lorsqu'on les dispose entre les pôles, de manière qu'ils forment une partie du circuit, et que leur substance soit traversée par les fluides contraires, comme les fils métalliques des expériences précédentes. Mais avant d'étudier ces effets, il importe de prendre une idée de ce qui constitue la force de la pile.

398. *De la force de la pile.* — On peut distinguer dans une pile la force de *production*, la force de *propagation*, et la force de *tension*.

1°. La *force de production* est dépendante de la force électromotrice, c'est-à-dire de l'énergie avec laquelle les fluides sont séparés au contact des élémens. Nous avons déjà dit que tous les métaux ne prennent pas en se touchant des charges ou des épaisseurs électriques égales; ainsi deux piles tout-à-fait pareilles, mais construites avec des métaux différens, ne pourront pas produire dans le même temps une même quantité de fluide. Il arrive heureusement que le zinc et le cuivre, qui se rencontrent partout et à bas prix, sont, entre tous les corps connus, ceux qui prennent les plus fortes charges électriques par leur contact. Par conséquent les piles construites avec ces métaux sont, toutes choses égales d'ailleurs, celles qui possèdent la plus grande force de production.

2°. La *force de propagation* de la pile ne dépend que de la nature et des dimensions du conducteur qui sépare les couples, car l'électricité ne peut arriver aux deux pôles pour parcourir le fil qui les joint, qu'après avoir traversé toutes les rondelles humides, ou en général tous les intervalles qui se trouvent entre les couples; si elle est retardée dans ce mouvement par l'imperfection du conducteur, la

pile donne d'abord une décharge en vertu des tensions qu'elle possède à ses deux extrémités, mais après ce premier choc la propagation se rallentit; au contraire, si le conducteur est assez bon pour offrir un libre écoulement au fluide qui se développe sans cesse entre les élémens, la propagation est rapide et toujours égale. Dans tous les cas on peut considérer la longueur du circuit de la pile comme une espèce de canal, dans lequel les fluides électriques se meuvent avec plus ou moins de vitesse et de liberté, suivant que les conducteurs sont plus ou moins parfaits; le fil qui joint les pôles ne laisse passer dans un temps donné que la quantité de fluide qui a pu traverser la pile dans le même temps; d'où il résulte, par rapport aux dimensions du conducteur humide, que la force de propagation de la pile est en raison inverse de son épaisseur, et en raison directe de sa largeur: car nous verrons plus tard que la conductibilité des corps suit sensiblement ces deux lois remarquables.

L'eau est un mauvais conducteur; toute pile aurait une faible force de propagation, si elle était *chargée* ou *amorcée* avec de l'eau pure. Aussi emploie-t-on habituellement des dissolutions salées ou alcalines, et surtout des dissolutions acides; l'eau contenant environ $\frac{1}{16}$ d'acide sulfurique et $\frac{1}{20}$ d'acide nitrique, est le conducteur humide que l'on préfère; il est assez parfait pour donner passage aux fluides électriques, et en même temps il n'exerce pas une action chimique assez puissante pour corroder trop vite les élémens de la pile.

3°. *La force de tension* change avec la nature des élémens de la pile, mais elle est toujours proportionnelle à leur nombre, à moins que le conducteur ne soit assez mauvais. En effet, nous avons vu que sur le 2e zinc la tension est double de ce qu'elle est sur le 1er, qu'elle est triple sur le 3e, et ainsi de suite; or, si la force électromotrice qui s'exerce au contact du zinc et du cuivre, peut accumuler sur le zinc une tension d'électricité vitrée double de la ten-

sion qu'elle accumulerait sur un autre métal, sur du fer, par exemple, il est évident que pour le même nombre d'élémens la tension d'une pile de *zinc et cuivre* aurait toujours une tension double d'une pile *de fer et cuivre*. C'est ainsi que la tension change avec la nature des élémens. Mais elle ne dépend ni de leur grandeur, ni de l'étendue de la surface suivant laquelle ils se touchent; pour le démontrer il suffit de construire deux piles *semblables*; c'est-à-dire ayant le même nombre de couples, le même conducteur et les élémens de différentes grandeurs; ceux de la première étant, par exemple, de 1 centimètre carré, et ceux de la seconde de 1 décimètre. Alors, avec le plan d'épreuve, ou avec le condensateur à taffetas, l'on pourra reconnaître qu'elles ont exactement la même tension à leurs pôles, soit qu'on les observe pendant qu'elles sont isolées, soit qu'on les observe pendant que l'un de leurs pôles communique au sol. Enfin, si l'on construit deux piles qui ne diffèrent entre elles que parce que les élémens de l'une se touchent dans toute leur étendue, tandis que les élémens de l'autre se touchent par une surface très-petite, on verra, par les mêmes moyens, qu'elles ont exactement la même tension. Ces conséquences ne se réaliseraient pas si les conducteurs étaient très-mauvais.

399. *Diverses dispositions de la pile.* —La *pile à colonne* dont nous avons parlé jusqu'à présent, est assez commode pour la démonstration, mais elle offre de grands inconvéniens dans la pratique. Les rondelles inférieures, comprimées par le poids des élémens supérieurs, se dessèchent promptement, et le liquide qui s'en écoule, en ruisselant sur la surface de la pile, établit entre les couples des communications partielles qui diminuent d'autant l'effet total.

La *pile à couronne* est plus curieuse qu'utile, mais elle est si facile à faire qu'il est bon d'en indiquer la construction. Les élémens qui la composent sont de petites bandes ou même de petits fils de zinc et de cuivre, soudés bout à

bout, ou seulement attachés par deux ou trois tours de torsion, et ensuite courbés en chevron. Des verres remplis d'eau acidulée étant disposés en rond ou *en couronne*, l'on met un chevron du premier au second, puis un autre du second au troisième, et ainsi de suite, avec la seule attention de les tourner dans le même sens. Si le premier verre contient l'extrémité cuivre du premier chevron, il formera le pôle négatif de la pile, tandis que le dernier verre contenant une extrémité zinc, en sera le pôle positif.

La *pile à auges* a été long-temps en usage; elle est représentée dans la *figure* 116. Les élémens sont rectangulaires et soudés l'un sur l'autre, pour former un couple; tous les couples sont disposés de champ et parallèlement, dans une caisse en bois, BB', dont les parois intérieures sont revêtues d'un mastic non conducteur; l'intervalle de deux couples forme une petite auge dans laquelle on met l'eau acidulée; c'est cette lame d'eau de deux ou trois lignes d'épaisseur qui remplace la rondelle humide de la pile à colonne: ainsi il faut avoir grand soin que les auges successives n'aient entre elles aucune communication, ni par les bords, ni par la tranche supérieure des couples. En réunissant plusieurs piles semblables à celle qui est représentée dans la figure, on compose une *batterie galvanique* ou *voltaïque*. La réunion peut se faire de deux manières: les piles ayant, par exemple, cent couples de chacun 1 décimètre carré, si en on réunit deux, en faisant communiquer les deux pôles négatifs ensemble, et les pôles positifs ensemble, on aura une batterie de *cent* couples ayant chacun *deux* décimètres carrés; c'est la force de propagation qui sera doublée: au contraire, si on les réunit en faisant communiquer le pôle positif de la première avec le pôle négatif de la seconde, on aura une batterie de *deux cents* couples, ayant chacun 1 décimètre carré; c'est la force de tension qui sera doublée. Nous verrons plus tard que pour produire certains effets, ces batteries sont complètement différentes. La grande pile

de l'École polytechnique était construite d'après ces principes; elle se composait de six cents paires de 1 pied carré. Celle de la Société Royale de Londres se composait de deux mille paires, les unes de six pouces et les autres de quatre pouces de côté.

La *pile de Wolaston* est représentée dans la *figure* 115; elle est maintenant la plus commode que l'on connaisse, et celle qui semble combinée d'après les meilleurs principes. Pour en mieux indiquer la construction, nous examinerons seulement deux couples représentés en section (*Fig.* 121), et de face (*Fig.* 120); cs est le premier cuivre, sz le premier zinc, vu par son épaisseur; ils sont soudés en s; $c's'$ est le deuxième cuivre, et $s'z'$ le deuxième zinc; v et v' sont des vases remplis d'eau acidulée; l'électricité vitrée passe du premier zinc au deuxième cuivre par la couche d'eau qui les sépare; elle passe de même du deuxième zinc au troisième cuivre, et ainsi de suite. Cette disposition offre surtout deux grands avantages; premièrement, le fluide qui est sur le zinc peut en sortir par tous les points de la surface; secondement, il n'a qu'une couche liquide très-mince à traverser pour se porter sur le cuivre, et cette couche, qui se trouve promptement altérée dans la pile à auge, peut ici se renouveler en se mélangeant au liquide du vase. Voilà pourquoi la pile de Wollaston a une force de propagation beaucoup plus grande que toutes les autres piles; car tout s'y trouve disposé de la manière la plus heureuse pour favoriser la conductiblité.

Un seul couple de cette espèce ayant seulement quelques pouces carrés de surface, est capable de produire des phénomènes étonnans; il peut, par exemple, faire rougir un fil de platine. L'expérience en est représentée dans la *figure* 124; cs est le cuivre, sz le zinc, l'enveloppe $c'c'c'$ ne sert qu'à favoriser la conductibilité; un petit fil de platine est tendu de P en P', et quand on plonge ce couple par le manche m dans un vase d'eau fortement acidulée,

le fil de platine devient rouge à l'instant, par le seul effet du courant qui le traverse.

Avec une pile d'une douzaine de couples, disposée comme celle de la figure 115, on peut faire à peu près toutes les expériences galvaniques.

Cependant il y a de grands effets qui ne peuvent être produits que par des batteries beaucoup plus fortes, et je décrirai ici celle que je fis construire pour le Prince Royal il y a trois ans, lorsqu'il se livrait à l'étude des sciences avec ce vif intérêt et cette étonnante élévation d'esprit qu'il porte maintenant dans des affaires d'un autre ordre. Cet appareil fait partie du cabinet de physique et du laboratoire de chimie que le Roi a bien voulu me confier pour l'instruction de ses enfans, et où le duc de Nemours se prépare, avec autant de succès que son frère, à approfondir les hautes questions théoriques et les grandes applications industrielles de la physique et de la chimie.

La batterie galvanique du Palais-Royal est construite sur le principe de la pile de Wollaston; elle se compose de 160 élémens de chacun 7 pouces sur 5, et cependant elle n'occupe qu'un espace de 7 pieds sur 4, et elle peut être mise en jeu avec la plus grande facilité.

La *figure* 126 en représente une vue, et la *figure* 127 une coupe transversale. P et P' sont deux pieds en bois, portant chacun deux montans M, N, et M′, N′; quatre planchers p', q', r', s' (*Fig.* 127), garnis en plomb et munis de robinets, portent chacun quatre rangées de dix vases. Huit traverses $t\,t'$, quatre pour les montans M, M′, et quatre pour les montans N, N′, portent chacune deux rangées de dix couples. On voit dans les montans M, M′, N, N′, les mortaises dans lesquelles les traverses peuvent monter et descendre, les chevilles c, qui les tiennent suspendues, et les entailles par lesquelles elles peuvent sortir lorsqu'on veut faire quelques réparations. Les grandes lames de cuivre, l, l, l, servent à établir la communication entre les cou-

ples des différentes traverses; il est visible que l'on peut n'employer que vingt couples à la fois. Pour charger la pile, on emploie des entonnoirs à robinet E (*Fig.* 128), qui tiennent la mesure d'un vase. Une grande cage en bois, qui se meut sur des roulettes, et qui a une porte à chaque bout, peut recouvrir tout l'appareil et laisser seulement sortir les fils conducteurs de chaque pôle.

La *pile en hélice* est une modification de la pile de Wollaston; elle est surtout destinée à produire de grandes quantités d'électricité sans donner de grandes tensions. Les *figures* 129, 130 et 131 représentent les dispositions que j'ai adoptées pour la pile de la Faculté des Sciences. Sur un cylindre en bois *b* (*Fig.* 131), de trois pouces de diamètre et d'un pied de long, on enroule deux lames, l'une en zinc et l'autre en cuivre, qui sont séparées par des bouts de lisière en drap *l*, joints par de petites ficelles, dont l'épaisseur est un peu moindre que celle de la lisière. On forme ainsi des couples dont les deux élémens ont chacun cinquante ou soixante pieds de surface; ces couples sont ajustés dans de fortes barres en fer, F' F' (*Fig.* 129), au moyen des tiges de fer *vf*, et des écrous *rr*, etc. Dans cette disposition les couples restent fixes; c'est le plancher P et les seaux en bois *s*, *s*..., contenant l'eau acidulée, qui montent et qui descendent au moyen des cordes *c d r*, *c' d' r'*, du treuil T T' de la roue dentée R, et de la manivelle M. Les communications sont établies entre les divers couples par de larges lames en cuivre *l*, *l*, qui peuvent facilement se dessouder lorsqu'il est nécessaire de démonter l'appareil pour le transporter. La première de ces lames est soudée au zinc du premier couple et au cuivre du deuxième; la deuxième est soudée au zinc du deuxième couple et au cuivre du troisième, etc. C'est entre ces lames et le zinc que s'exerce la force électro-motrice, et non pas entre le zinc et les grandes feuilles de cuivre qui en sont séparées par les lizières. La batterie de douze couples, représentée

dans la figure 130, est capable de produire de grands effets, et l'usage m'a démontré que cette disposition n'est pas sans avantage.

400. *Effets physiologiques de la pile.* — Avec les données précédentes nous pouvons étudier les divers effets de la pile, en distinguant les *effets physiologiques*, les *effets physiques* et les *effets chimiques*.

Les *commotions* que produit l'électricité de la pile ne sont ni moins vives ni moins redoutables que celles des batteries ordinaires. Leur intensité dépend surtout du nombre des paires, et par conséquent de la force de tension : la forte pile en hélice de la Faculté des Sciences, composée de douze paires de cinquante pieds de surface, ne donne que de très-faibles commotions, tandis qu'une petite pile de quarante ou cinquante couples d'un pouce de diamètre, donnerait des commotions assez vives pour se faire sentir jusque dans la poitrine. L'épiderme est un mauvais conducteur, et l'on peut, avec les mains sèches, établir la communication entre les pôles d'une pile de vingt ou trente paires, sans éprouver la moindre secousse, mais avec les mains mouillées, ou seulement humides, on reçoit le choc instantanément; le courant qui s'établit alors dans les membres continue de les agiter aussi long-temps que dure le contact. Pour faire l'expérience sans danger, l'on peut, d'une main, toucher l'un des des pôles, et de l'autre main toucher successivement des couples de plus en plus éloignés; si, par exemple, on touche le dixième ou le vingtième, on ne reçoit la commotion que des dix ou vingt couples compris entre les deux mains : de la sorte, chacun peut graduer la vigueur du choc, et le proportionner à sa constitution; car le même courant, qui produirait une rude secousse sur une personne, pourrait, sur une autre, n'exciter qu'un petit frémissement, ou quelques picotemens à l'extrémité des doigts. En présence d'une grande pile d'une centaine de couples, il n'est pas nécessaire

d'établir la communication entre les deux pôles pour être ébranlé par une forte secousse : les électricités accumulées sur chaque moitié de la pile ont une grande tension, et dès qu'elles trouvent un corps conducteur, elles s'y précipitent avec violence; mais alors la secousse n'est pas durable. On serait sans doute renversé et peut-être gravement blessé, en faisant passer par les bras et la poitrine le courant d'une pile de quelques centaines de paires, fortement chargée.

Dans les premiers temps du galvanisme, on a fait de nombreuses expériences sur les effets thérapeutiques des courans de la pile; on a essayé surtout de guérir les Névralgies, la Goutte, les Rhumatismes, les Paralysies, etc. On dirigeait les courans comme les décharges électriques, au moyen d'armatures métalliques disposées de part et d'autre des organes affectés, et l'on augmentait peu à peu le nombre des paires de la pile, pour rendre les commotions plus vives et plus efficaces. On a obtenu quelques effets, on a même annoncé des cures merveilleuses; mais en discutant toutes les observations, il paraît, en dernier résultat, que le courant électrique est au moins un remède excessivement capricieux, qui stimule ou qui distrait pendant quelques instans, et qui produit rarement des effets durables; s'il y a en lui une chose constante, c'est la douleur qu'il cause au malade; cette douleur, à la vérité, est très-supportable, et, peut-être, quand elle se fait sentir dans un membre paralysé on peut la prendre pour un commencement de guérison.

Dans les corps récemment privés de la vie, un courant énergique excite encore des commotions et des mouvemens extraordinaires : on dirait que toute l'organisation s'agite et fait d'incroyables efforts pour se ranimer; mais ces violentes convulsions cessent avec le courant, et tout retombe dans l'inertie de la mort.

Cependant, dans une série d'expériences que nous avons

faites avec MM. Magendie, Andral et Roulin, sur l'irritabilité produite par les courans électriques, nous avons reconnu que des animaux asphyxiés sont promptement rappelés à la vie lorsqu'on les met entre les deux pôles de la pile. Nous avons plusieurs fois ranimé des lapins et des cochons d'Inde qui étaient asphyxiés depuis plus d'une demi-heure.

Nous avons reconnu pareillement que le courant excite des mouvemens péristaltiques très-remarquables dans plusieurs vaisseaux.

Enfin des expériences faites avec soin, tant en France qu'en Angleterre, semblent indiquer que les fonctions digestives, complètement suspendues par la section des nerfs qui se rendent à l'estomac, se trouvent rétablies par un courant électrique, et s'accomplissent régulièrement sous son influence.

La commotion est sans doute le plus simple de ces phénomènes physiologiques; elle est produite par l'électricité ordinaire, comme par l'électricité de la pile, et cependant on ne sait rien jusqu'à présent sur sa véritable cause. Quelles sont les substances organiques que le fluide affecte de préférence? quelles sont les modifications qu'il imprime, ou à leurs molécules individuelles, ou au système qu'elles composent? c'est sans doute ce que des expériences ultérieures feront connaître. Il y a beaucoup plus à espérer des recherches qui seront dirigées vers ce but, que de celles que l'on pourra tenter encore pour découvrir des moyens curatifs. Les substances inorganiques sont, comme nous allons le voir, échauffées par le courant, ou décomposées chimiquement; et il est probable que dans les corps vivans ce n'est ni l'un ni l'autre de ces effets qui produit la commotion; il serait curieux d'examiner si les parties contractiles des plantes sont mises en mouvement par le courant, et si elles possèdent à un degré plus ou moins marqué la sensibilité électrique des corps vivans. Ce qui constitue cette

sensibilité, les fibres ou les tissus qui en jouissent, et les modifications qu'ils éprouvent, voilà ce qu'il faut chercher.

Nous ajouterons ici qu'il paraît résulter de quelques expériences de Volta, de M. Lehot, du docteur Bellingieri, et surtout de M. Marianini, que, quand le courant électrique se propage dans les nerfs, *dans le sens de leurs ramifications*, il produit une contraction musculaire au moment où il pénètre, et une sensation au moment où il cesse, et qu'au contraire quand il s'y propage *en sens inverse* de leurs ramifications, il produit une sensation tant qu'il subsiste, et une contraction au moment où il cesse (*Ann. de phys. et de chim.*, t. 40, pag. 225).

401. *Effets physiques de la pile.* — Les courans peuvent produire, comme les décharges des batteries ordinaires, de la chaleur, de la lumière et du magnétisme; ce dernier effet, et l'action mutuelle que les courans exercent les uns sur les autres, constituent l'électro-magnétisme, que nous devons étudier dans le livre suivant.

Lorsqu'un fil métallique assez fin et assez court établit une communication directe entre les pôles de la pile, il s'échauffe, devient rouge, rouge-blanc, et souvent même il se fond et se volatilise.

Les douze couples de la *figure* 130 peuvent, en quelques secondes, porter au rouge blanc un fil de platine de 1 mètre de long sur un millimètre d'épaisseur, et le maintenir dans cet état pendant tout le temps que la pile est en activité. Un fil plus mince ou plus court se fond et tombe en globules.

Le fer et l'acier sont liquéfiés encore avec plus de facilité : alors ils brûlent avec un éclat éblouissant.

Les minces feuilles d'or sont volatilisées, et comme on ne peut en toucher un point sans le réduire en vapeur, il s'établit de nombreuses solutions de continuité entre lesquelles on voit briller une foule de petits éclairs d'une couleur verte très-vive.

Les feuilles d'argent présentent à peu près les mêmes phénomènes.

Les feuilles d'étain brûlent avec moins d'éclat; elles tombent en petits globules rouges, qui donnent naissance à des houppes soyeuses flottantes, semblables à des flocons de toile d'araignée.

Le platine en éponge, et tous les métaux en feuilles minces ou en limailles offrent quelques particularités curieuses, dépendantes de leur nature, de leur fusibilité et de leur affinité pour l'oxigène.

Pour qu'il se développe une grande chaleur, il n'est nullement nécessaire que la pile ait une grande tension; un seul couple de cinquante ou cent pieds de surface, ne donnant pas la moindre commotion perceptible, est capable de mettre en fusion des fils de fer, ou même des fils de platine assez longs; ainsi les quantités de chaleur paraissent dépendre des quantités de fluide qui passent, plutôt que de la tension avec laquelle ils sont lancés. Cependant on ne sait pas, d'une manière certaine, si un seul couple de cent pieds carrés de surface donnerait autant de chaleur que cent couples de un pied carré, en supposant que le liquide conducteur fût le même dans les deux cas, et que la distance du zinc au cuivre *qui l'enveloppe* fût aussi la même.

Quand le fil de métal est en communication permanente avec l'un des pôles, et qu'on l'approche de l'autre pôle à une très-petite distance, il se présente plusieurs phénomènes remarquables. Le courant d'étincelles produit une lumière éblouissante, le point vis-à-vis lequel se trouve l'extrémité du fil est rapidement échauffé; si c'est du mercure, il se vaporise avec grand bruit; si c'est du cuivre, il brûle avec une flamme verte et pourpre extrêmement vive; si c'est du platine, il entre en fusion; tout cela se conçoit, puisque le fluide, qui se propage librement dans l'étendue du conducteur, est obligé de se resserrer et de s'accumuler

pour sortir par le seul point qui est en présence du fil; mais ce qui me semble tout-à-fait remarquable, c'est que l'extrémité du fil se liquéfie elle-même, qu'elle forme un globule volumineux tout incandescent, tandis que le reste du fil est à peine échauffé. D'où vient cette grande chaleur en un seul point, lorsqu'il est évident que toutes les sections du fil cylindrique donnent passage au même instant à la même quantité de fluide qui sort à son extrémité? Il me semble nécessaire d'admettre qu'en traversant les surfaces, le fluide électrique produit plus de chaleur qu'en traversant, dans une masse homogène, une section d'égale étendue.

Aussitôt que les communications sont bien établies, le fil prend sensiblement la même chaleur dans toutes ses parties; mais les différens métaux présentent, sous ce rapport, de grandes différences. M. Children en a fait la comparaison d'une manière ingénieuse et commode, au moyen d'un grand appareil à la Wollaston de vingt-un couples, dans lesquels le zinc offrait trente-deux pieds de surface (*Trans. philosoph.*, 1815). Après avoir préparé, avec toutes les substances, des fils de même diamètre et de même longueur, il essayait chacun d'eux avec tous les autres; par exemple, l'or avec le cuivre, le zinc, le platine, etc.

L'or étant en communication avec l'un des pôles, le fer en communication avec l'autre, on approchait jusqu'au contact les extrémités libres de ces deux fils; le fer entrait en vive ignition, l'or n'éprouvait pas de changement sensible. Tous les fils avaient huit pouces de long et environ un tiers de ligne d'épaisseur.

Or et *platine;* le platine devient rouge-blanc, l'or ne change pas.

Or et *argent;* l'or entre en ignition et non l'argent.

Or et *cuivre;* l'un et l'autre en ignition.

Platine et *fer;* le platine est rouge-blanc, le fer coule.

Platine et *zinc;* le platine est rouge-blanc, le zinc ne change pas.

Fer et *zinc;* le fer coule, le zinc ne fond pas.

Zinc et *argent;* le zinc entre en ignition et coule, l'argent ne change pas.

En chargeant sa batterie avec de l'eau plus acidulée, M. Children obtint des effets de chaleur d'une intensité prodigieuse.

Un fil de platine de 5 pieds 6 pouces de long, et de $\frac{11}{100}$ de pouce d'épaisseur devint rouge-blanc.

Une tige carrée de platine de 2 lignes de côté, et de 2 pouces 3 lignes de longueur, entra en fusion.

Divers oxides terreux furent fondus et en partie réduits.

Après avoir scié un fil de fer dans la moitié de son épaisseur, et rempli la fente avec de la poussière de diamant, le diamant fut liquéfié et le fer qui le touchait transformé en acier.

Le D. Robert Hare, avec un appareil de quatre-vingts couples en hélice, qu'on appelle *deflagrator*, a obtenu des effets de chaleur encore plus étonnans; il paraît qu'il a pu fondre du charbon et de la plombagine.

Une des expériences les plus curieuses sur ces effets de lumière et de chaleur, est celle que l'on doit à sir H. Davy, et dont nous aurons occasion de parler encore dans l'électro-magnétisme. Elle peut se diposer de la manière suivante: dans une grande cloche ou dans un ballon de 10 à 12 pouces de diamètre, on adapte deux boîtes à cuir, opposées l'une à l'autre, par lesquelles on fait passer deux fortes tiges qui peuvent s'approcher jusqu'au contact, ou s'éloigner à volonté. A l'extrémité de chaque tige on attache un petit cône de charbon fortement calciné et éteint dans le mercure; il est nécessaire que le charbon touche le métal par une grande surface. Alors on fait le vide dans l'appareil, on avance les tiges de manière que les pointes des cônes se trouvent à une petite distance, et l'on établit la communi-

cation entre les deux pôles d'une forte pile; bientôt le courant franchit l'espace qui sépare les charbons, échauffe leurs pointes et les rend éblouissantes de lumière; rien n'est comparable à l'éclat qu'elles prennent. Dès cet instant, l'on peut écarter les tiges graduellement, le courant ne cesse pas de traverser le vide qui les sépare, et, de cette manière, on produit un faisceau étincelant qui remplit tout l'appareil. Le phénomène ne se montre pas avec moins d'éclat dans de l'air raréfié à quelques centimètres de pression, mais alors le charbon se consume en partie. Nous verrons plus tard qu'il y a une analogie remarquable entre cette vive lumière et celle des aurores boréales.

402. *Effets chimiques de la pile.* — Le premier et le plus remarquable des effets chimiques de la pile fut découvert au commencement de ce siècle (le 30 avril 1800), par MM. Carlisle et Nicholson. Ces deux physiciens, pour répéter les expériences de Volta, avaient construit à la hâte une pile à colonne, avec des pièces de monnaie, des plaques de zinc et des rondelles de carton. Après quelques essais, l'odeur particulière de l'hydrogène s'étant fait sentir, Nicholson eut l'heureuse idée de faire passer le courant dans un tube plein d'eau, par le moyen de deux fils de métal qui s'approchaient à une petite distance. Bientôt l'hydrogène parut en petites bulles, tout autour du *fil négatif*, et le *fil positif* s'oxidait visiblement. Ainsi les deux élémens de l'eau furent enfin séparés; car Cavendish avait bien pu composer de l'eau avec de l'oxigène et de l'hydrogène, mais, jusque là, tous les efforts avaient été impuissans pour la décomposer.

L'appareil qui nous sert maintenant pour la séparation des élémens de l'eau est représenté dans la *figure* 122; il se compose d'un verre à pied dont le fond est traversé par deux fils de platine f, f' qui ne doivent pas se toucher; les cloches o et h, renversées et pleines de liquide, couvrent chacun des fils. Aussitôt qu'on établit la communication

avec les pôles de la pile, les bulles de gaz se dégagent en abondance; l'oxigène pur monte toujours dans la cloche qui couvre le fil positif, et l'hydrogène pur toujours dans celle qui couvre le fil négatif. Il est évident que les deux cloches doivent communiquer entre elles par le liquide intermédiaire, car le courant ne peut pas traverser le verre.

L'eau distillée et parfaitement pure se décompose lentement; mais dès qu'on y met une goutte d'un acide quelconque, ou quelques atomes de sel, ou quelques parcelles d'une substance qui augmente sa conductibilité, les bulles de gaz se dégagent vivement, et il ne faut que deux ou trois minutes pour voir 1 centimètre cube d'oxigène dans la cloche positive, et 2 centimètres cubes d'hydrogène dans la cloche négative.

Deux atomes d'hydrogène à l'un des pôles et un atome d'oxigène à l'autre, voilà un phénomène bien surprenant et qui a long-temps exercé la sagacité des physiciens; car, dans les décompositions ordinaires, les élémens se désunissent et ne s'éloignent pas l'un de l'autre, tandis qu'ici il y a tout à la fois séparation et *transport* des élémens séparés. On a fait des tentatives sans nombre pour saisir la molécule d'eau qui se décompose, ou pour arrêter en chemin les atomes gazeux avant qu'ils fussent arrivés aux fils de métal, d'où l'électricité passe dans le liquide; mais rien n'a réussi. Par exemple, quand on met de l'eau dans deux vases, que l'on fait plonger le fil positif dans l'un, le fil négatif dans l'autre, et qu'ensuite on établit la communication entre les vases par un corps conducteur pour que la circulation électrique puisse s'établir, on observe des phénomènes singuliers : si le conducteur intermédiaire est un métal, l'eau est encore décomposée, comme à l'ordinaire, mais dans chaque vase séparément; s'il est un corps humide, quelquefois encore il la décompose comme un métal, mais le plus souvent la décomposition se fait on ne sait où; l'oxigène paraît seul dans l'un des vases, dans le

positif, et l'hydrogène seul dans l'autre ; c'est ce qui arrive, par exemple, quand on établit la communication en plongeant un doigt dans chaque vase. Alors on semble en droit de conclure que l'un des élémens gazeux a dû traverser le corps pour se rendre au pôle où il se dégage. De même, quand on établit la communication avec un morceau de glace, il semble nécessaire que l'un ou l'autre des gaz passe au travers de la glace, puisque chacun d'eux ne se dégage qu'à l'un des fils métalliques.

M. Grotthuss a donné, de ces phénomènes et de toutes les autres décompoitions chimiques que produit le courant, une explication qui a été admise par tous les physiciens, non-seulement parce qu'elle est ingénieuse, mais parce qu'elle semble tout-à-fait conforme à la vérité. Concevons une file de molécules d'eau, 1, 2, 3, 4, etc. (*Fig.* 123), formant une espèce de chaîne droite, ou courbe qui joint le fil positif *f* au fil négatif *f'*; l'électricité positive de *f* agira par influence sur la molécule 1 et la *tournera* pour attirer l'oxigène qui est *électro-négatif* (382) et pour repousser l'hydrogène qui est *électro-positif;* la molécule 1 agira de même sur la molécule 2, et ainsi de suite; à l'autre extrémité de la chaîne la même disposition se produira; et dès que la tension électrique sera assez forte, l'oxigène de la molécule 1, entraîné par l'attraction, sera comme arraché des molécules d'hydrogène auxquelles il est uni et s'en viendra au pôle, tandis que l'hydrogène, devenu libre, se portera sur l'oxigène de la molécule 2 pour se combiner avec lui, donnant la liberté à l'hydrogène de cette molécule, qui s'en ira à son tour prendre l'oxigène de la molécule 3, et ainsi de suite. A l'autre pôle, des phénomènes analogues se produiront en sens inverse, et il y aura ainsi au même instant une foule de décompositions et de recompositions successives. Ce qui se passe dans une file de molécules, se passe dans toutes les files qui joignent les deux pôles, et de là, la multitude des atomes gazeux devenus

libres, et l'abondance des bulles distinctes qui se forment et qui se dégagent.

Ces mouvemens vibratoires des derniers élémens de la matière peuvent s'accomplir au milieu des masses solides comme au milieu des masses fluides; et certainement, si, comme tout semble l'indiquer, l'explication de M. Grotthuss est vraie pour la décomposition des liquides, elle ne peut manquer de l'être pour celle des solides et de tous les autres corps sur lesquels le courant électrique peut avoir quelque prise.

Les oxides sont réduits par la pile, et décomposés comme l'eau; l'oxigène paraît au pôle positif, et le métal ou la base au pôle négatif. Pour ceux qui sont facilement réductibles, pour l'oxide d'argent, par exemple, on peut disposer l'expérience de la manière suivante : Sur une lame de platine communiquant au pôle positif, on met de l'oxide sec en poudre, que l'on vient toucher ensuite avec le fil négatif; soit que le contact soit permanent, soit qu'il soit accidentel et renouvelé par intervalle, on voit bientôt paraître une petite loupe d'argent à l'extrémité du fil; dans le second cas, la poussière de l'oxide est traversée par de vives étincelles d'une belle couleur verte. Les oxides moins réductibles doivent être légèrement humectés d'eau, surtout lorsqu'ils sont en poudre. A la vérité, cette eau se décompose en partie; mais elle favorise la conductibilité, et après un certain temps on aperçoit, suivant la force de la pile, de petits globules ou de petites parcelles de métal autour du fil négatif.

Pendant long-temps on avait supposé que les alcalis, tels que la soude et la potasse, étaient des corps tout-à-fait indécomposables; mais, en 1807, au moyen d'une puissante batterie, sir H. Davy put en séparer les élémens. Cette découverte fut une grande époque pour la science. Les alcalis et les terres furent ramenés dans la classe ordinaire des oxides, et la chimie eut à sa disposition deux

corps métalliques nouveaux, le sodium et le potassium, qui sont deux des agens les plus énergiques qu'elle possède. Lorsqu'on tente la décomposition de la potasse par les méthodes que nous venons d'indiquer pour les autres oxides, l'on aperçoit bientôt que des globules nombreux paraissent au pôle négatif et s'enflamment dans l'air en produisant des jets de lumière. C'est le potassium qui résulte de la décomposition de la potasse; son affinité pour l'oxigène est si grande qu'il brûle dans l'eau avec plus d'éclat encore que dans l'air : aussi ne peut-on le conserver que dans l'huile rectifiée de naphte ou de pétrole, dont les élémens constitutifs sont l'hydrogène et le carbone. Le D. Seebeck a donné le moyen de recueillir plus sûrement le potassium au pôle de la pile; il a imaginé de former une petite capsule avec le fragment de potasse caustique que l'on veut décomposer; cette capsule est remplie de mercure et posée sur une lame de platine communiquant au pôle positif de la pile : alors, en touchant le mercure avec le pôle négatif, la décomposition s'opère. L'oxigène se porte sur le platine, et se dégage, tandis que le potassium arrive dans le mercure et forme avec lui un amalgame assez persistant. Par la distillation dans la vapeur du pétrole, l'on sépare ensuite le mercure, et l'on obtient le potassium à l'état de pureté.

La chaux, la baryte, la strontiane et la magnésie, traitées de la même manière, soit seules, soit mélangées avec la soude ou la potasse, ont donné des preuves non douteuses de leur décomposition : seulement les métaux qui en résultent, le calcium, le barium et le strontium, sont bien moins faciles à séparer du mercure, à cause de l'action très-vive qu'ils exercent, dit-on, sur le verre et sur tous les corps oxigénés pour enlever leur oxigène et repasser à l'état d'oxide.

La silice, l'alumine, la zircône et la glucine, sont beaucoup plus difficiles à réduire; et, si l'on doit à présent,

d'après les expériences décisives de Wöhler, les regarder comme des oxides à bases métalliques, on peut cependant conserver quelques doutes sur les expériences dans lesquelles on avait cru voir des traces de ces métaux au pôle négatif des fortes batteries.

Les acides se décomposent comme les oxides, et leur oxigène persiste encore à se rendre au pôle positif, tandis que la base vient au pôle négatif.

Enfin, tous les sels sont aussi décomposés par la pile; mais ils présentent des phénomènes plus variés.

1°. Quand l'acide et la base sont difficilement décomposables, ces deux élémens sont simplement séparés; et l'acide, comme participant davantage des propriétés de l'oxigène, se rend toujours au pôle positif, tandis que la base vient au pôle négatif;

2°. Quand l'acide est facilement décomposable, non seulement il est séparé de l'oxide, mais il est lui-même décomposé, ou au moins désoxigéné; et l'oxigène qu'il perd vient au pôle positif, tandis que le radical s'en va avec l'oxide au pôle négatif;

3°. Quand l'oxide est facilement décomposable, il est lui-même réduit; son métal pur vient au pôle négatif, tandis que l'oxigène se rend au pôle positif, où il se combine avec l'acide, quand celui-ci est capable de recevoir un nouveau degré d'oxigénation;

4°. Si l'acide et l'oxide peuvent l'un et l'autre perdre aisément leur oxigène, la décomposition est complète, tout l'oxigène vient au pôle positif, et le métal de l'oxide se rend au pôle négatif avec le radical de l'acide.

Ces divers phénomènes peuvent se produire avec des sels simplement humectés, ou avec des dissolutions salines plus ou moins étendues; dans ce dernier cas, surtout, l'eau est abondamment décomposée.

Pour un sel dont l'acide n'est pas l'acide fluorique et dont la base n'est pas l'une des terres ou l'un des alcalis qui se

décomposent difficilement, l'on peut à volonté obtenir la simple séparation de l'acide et de l'oxide, ou la réduction de l'un et l'autre. Il suffit pour cela d'employer une pile très-faible ou une pile très-puissante; et comme on peut affaiblir une pile en forçant le courant à traverser un grand espace mauvais conducteur, on voit que la seule distance des fils pourra déterminer l'un ou l'autre des phénomènes. Pour une petite distance entre le fil positif et le négatif, le courant ayant toute son énergie, l'acide sera décomposé et l'oxide réduit; pour une distance un peu plus grande, l'acide, par exemple, ne sera pas décomposé, et, pour une distance plus grande encore, l'oxide lui-même cessera d'être réduit; il n'y aura plus qu'une simple séparation des élémens du sel.

Les couleurs végétales qui changent par l'action des acides et des oxides sont très-propres à montrer aux yeux cette puissance décomposante de la pile. Si l'on prend, par exemple, dans un tube courbé en forme de V, une dissolution de teinture de tournesol, de chou rouge ou de petits radis violets, et qu'on y fasse passer le courant au moyen de deux fils de platine dont les extrémités sont à quelques lignes de distance, on aperçoit, après quelques instans, une belle couleur rouge de vin paillet dans la branche positive, et une couleur verte dans la négative. Le sel qui constitue la couleur végétale est donc décomposé; son oxide, en se portant au pôle négatif, fait tourner au vert tout le liquide voisin, et son acide, au contraire, fait passer au rouge le liquide qui touche le fil positif. En établissant la communication en sens inverse, on voit les couleurs produites disparaître peu à peu; pendant un instant les deux branches reprennent l'état naturel, et un moment après elles se colorent en sens contraire.

Sir H. Davy a profité des circonstances remarquables qui accompagnent la décompostion des sels, pour étudier plus particulièrement le phénomène si étonnant du transport.

Nous regrettons de ne pouvoir donner ici qu'un extrait fort abrégé de ses importantes recherches.

1°. Un vase contenant une dissolution saline et un autre vase contenant de l'eau distillée, communiquent entre eux par des filamens humides d'amiante. Le fil positif de la pile plonge dans le premier, le fil négatif dans le second, et la décomposition s'opère; si l'oxide n'est pas réduit, il chemine sur l'amiante, traverse l'eau, et vient se rendre au pôle négatif; s'il est réduit, c'est le métal qui parcourt ce trajet. Par exemple, avec le nitrate d'argent, tous les filamens soyeux de l'amiante se couvrent d'une multitude de petites parcelles d'argent revivifié. En établissant la communication en sens inverse, c'est l'acide qui parcourt l'amiante pour venir aciduler l'eau qui se trouve alors au pôle positif;

2°. La dissolution saline étant placée entre deux vases d'eau pure et communiquant avec chacun d'eux par de l'amiante, il y a encore décomposition et transport dès que les deux fils de la pile plongent, l'un dans le premier vase d'eau, et l'autre dans le second. L'acide est encore transporté au pôle positif et l'oxide au pôle négatif;

3°. Trois vases sont disposés comme dans l'expérience précédente : le premier contient de l'eau pure, le troisième une dissolution saline, et celui du milieu une teinture végétale, de tournesol ou de sirop de violette. Le sel est encore décomposé par le courant, et dans le vase d'eau pure on trouve l'acide ou l'oxide, suivant qu'on établit la communication dans un sens ou dans l'autre. Mais, et c'est un phénomène bien digne de remarque, dans aucun cas la teinture végétale n'éprouve d'altération; elle n'est ni rougie par l'acide, ni verdie par l'oxide; et cependant elle est à coup sûr traversée par l'un ou l'autre. Ainsi les élémens chimiques semblent perdre toute leur force d'affinité pendant qu'ils se trouvent sous l'action du courant électrique qui les emporte;

4°. Lorsqu'à la teinture végétale on substitue quelque dissolution alcaline très-concentrée et très-puissante, il y a des acides qui ne peuvent pas la traverser; ils sont arrêtés au passage; et, dans ces circonstances seulement, c'est la dissolution elle-même qui devient le pôle de la pile; le vase d'eau pure est encore traversé par l'électricité, mais l'acide ne peut arriver jusqu'à lui.

5°. Lorsqu'à la teinture végétale on substitue quelque acide très-puissant et concentré, il y a aussi des oxides qui ne peuvent le traverser; ils se combinent avec lui sans pouvoir se rendre au pôle qui les attire.

Ces deux derniers phénomènes sont une preuve que les affinités chimiques, toujours modifiées par le courant, ne sont pas toujours détruites par lui, et qu'il y a des cas où elles conservent encore assez d'énergie pour s'exercer malgré son influence. Peut-être un courant plus fort serait-il capable de neutraliser les actions chimiques qui s'exercent encore sous un courant plus faible.

Les divers oxides qui entrent dans la composition du verre peuvent eux-mêmes être réduits ou séparés par l'action de la pile. Les substances végétales et animales peuvent pareillement être décomposées lorsqu'elles sont humides. Ces phénomènes, auxquels on était loin de s'attendre quand on ne connaissait pas encore toute la puissance de l'appareil de Volta, répandaient une grande confusion dans les premières expériences. Par exemple, l'eau la plus pure devenait tantôt acide, tantôt alcaline, sous l'influence du courant. Quelques expérimentateurs y trouvaient alors de l'acide nitrique et de l'ammoniaque; d'autres de l'acide hydrochlorique; d'autres enfin un acide qu'ils proposaient d'appeler acide électrique, supposant qu'il était formé de toutes pièces par une combinaison véritablement chimique du fluide électrique et de l'eau.

Sir H. Davy expliqua le premier l'origine de toutes ces substances, démontrant qu'elles provenaient du verre ou

des membranes végétales ou animales que l'on employait dans les expériences ; il fit connaître en même temps le phénomène du transport dans ses détails, et jeta les premiers fondemens de la science électro-chimique (*Trans. phil.*, 1807, et *Ann. de Chimie*, t. 63). C'est ainsi qu'il débuta dans cette immense carrière, où il devait faire de si belles découvertes et mériter une si grande renommée.

On doit au D. Seebeck la connaissance d'un phénomène très-singulier qui se produit aussi par l'action de la pile (*Ann. de Chimie*, mai 1808). MM. Berzélius et Pontin (*Bibliothèque britannique*, juin 1809), sir H. Davy (*Ann. de Chimie*, août 1810), et MM. Gay-Lussac et Thenard (*Rech. physico-chimiques*, 1er vol.) ont fait des recherches sur ce phénomène, qui a été l'objet d'une assez longue controverse. Voici les circonstances dans lesquelles il se produit : l'on met quelques grammes de mercure dans une capsule d'hydrochlorate d'ammoniaque (*Fig.* 117) ; on la pose sur une lame métallique communiquant au pôle positif d'une forte pile, et dès qu'on touche le mercure avec le fil négatif, le courant s'établit, le volume de mercure augmente à vue d'œil ; il croît comme un champignon, prend de la consistance, et devient jusqu'à cinq ou six fois plus grand que le volume primitif. Si l'on supprime les communications, ce champignon décroît peu à peu, et le mercure reprend son état liquide ; l'amalgame qui s'était formé ne subsiste que sous l'influence du courant.

L'ammoniaque concentrée et la plupart des sels ammoniacaux donnent le même résultat que l'hydrochlorate d'ammoniaque. L'amalgame ainsi formé a les propriétés suivantes : Sa pesanteur spécifique est comprise entre 2 et 3 ; à la température de 25° centigrades il a la consistance d'une pâte un peu ferme ; à 0 il se consolide et *cristallise*, ce qui est une preuve que les élémens qui le constituent ne forment pas un mélange accidentel, mais une véritable combinaison ; les cristaux qu'il donne alors sont cubiques, et

paraissent souvent aussi gros et aussi réguliers que ceux de bismuth. D'après MM. Gay-Lussac et Thenard, un volume de mercure, pour prendre cet état, absorbe un volume d'hydrogène, représenté par 3,47, et un volume d'ammoniaque représenté par 4,22. Dès que cet amalgame est abandonné à lui-même, l'hydrogène et l'ammoniaque se dégagent en totalité, et, s'il y a lieu, se combinent avec les corps qu'ils rencontrent.

Sir H. Davy a formé un composé analogue sans influence électrique, en mettant du mercure chargé de potassium en contact avec du sel ammoniac légèrement humide. Cet amalgame est plus persistant que le premier. La présence du potassium semble en contenir les élémens volatils; mais que ce métal repasse à l'état d'oxide ou seulement qu'il s'étende dans une trop grande masse de mercure, à l'instant la décomposition s'opère, l'hydrogène et l'ammoniaque se dégagent, et les volumes de ces gaz que l'on peut recueillir sont à peu près les mêmes que dans l'amalgame électrique; il paraît cependant que le volume d'hydrogène restant 3,47, celui d'ammoniaque peut être quelquefois de 8,67. Telle est du moins l'opinion de MM. Gay-Lussac et Thenard, qui nous semble fondée sur des expériences tout-à-fait concluantes.

403. *Effets chimiques et mécaniques de la pile.* — Un vase en verre étant séparé en deux compartimens par une cloison verticale faite avec une membrane de vessie, ou avec une feuille de papier enduite d'albumine coagulée par la chaleur, on peut opérer la décomposition d'une dissolution quelconque, comme si la cloison n'existait pas; car la membrane, en s'imbibant, établit une communication suffisante entre les liquides des deux compartimens, dans chacun desquels plonge l'un des fils de la pile. Mais, pendant que le phénomène chimique s'accomplit, il se manifeste aussi un phénomène mécanique remarquable : le liquide passe au travers de la membrane, comme poussé par une force qui l'entraîne du côté *positif* au côté *négatif*, et

dans peu de temps on observe une différence de niveau très-sensible. La nature de la dissolution paraît être sans influence sur le résultat; c'est toujours dans le compartiment négatif que le niveau s'élève. Cette expérience curieuse est due à M. Porrett (*Annals of philos.*, juillet 1816, et *Ann. de Chimie*, t. II, 1816).

Pour disposer l'appareil d'une manière plus commode, on peut prendre un large tube fermé par un bout avec une membrane et plongé verticalement dans un vase ouvert. Alors le niveau du liquide étant le même dans le tube et dans le vase, on plonge le fil négatif dans le premier et le positif dans le second; après quinze ou vingt minutes la différence de niveau peut être de plusieurs pouces.

J'ai souvent observé un autre phénomène qui paraît tenir aux mêmes causes. Un siphon renversé contient du mercure jusqu'à 3 ou 4 pouces de hauteur dans chaque branche; lorsqu'on fait passer le courant, le mercure éprouve des oscillations sensibles; mais si d'un côté l'on verse une dissolution saline dans laquelle on plonge le fil négatif, tandis que de l'autre côté le fil positif touche au mercure, alors la dissolution se glisse peu à peu entre le verre et le mercure, et bientôt elle passe en totalité dans l'autre branche.

Dans d'autres circonstances on observe encore, au milieu des masses liquides, des mouvemens singuliers qu'il est excessivement difficile de décrire, tant ils sont nombreux et changeans. Je vais essayer d'en donner une idée, en remarquant toutefois, qu'après avoir fait de nombreuses expériences sur ce sujet, il m'a été impossible d'en saisir la loi.

M. Erman avait remarqué, dès 1808, que des globules de mercure prennent un mouvement de rotation très-rapide lorsqu'ils sont en contact avec certains corps, ou exposés au courant de la pile (*Ann. der Phys.*, de Gilbert, t. XXXII, pag. 261).

Sir H. Davy, dans ses *Elémens de philosophie chimique*,

rapporte un phénomène analogue : de l'eau contenant $\frac{1}{2000}$ de sulfate de potasse était dans un large vase en verre, de 10 pouces de diamètre, et quelques globules de mercure déposés au fond du vase éprouvaient une vive agitation lorsqu'on faisait plonger *dans l'eau* les deux fils d'une forte batterie. Ces globules s'allongeaient du côté négatif, et l'on voyait un rapide courant d'oxide s'établir du pôle positif vers le négatif. En même temps du potassium s'amalgamait avec le mercure; car, les communications étant supprimées, on voyait des bulles d'hydrogène paraître autour des globules, et l'on reconnut par les réactifs qu'il se formait de la potasse.

M. Serullas a pareillement observé les mouvemens gyratoires que prennent les divers alliages de potassium ou de sodium, lorsqu'on en met des fragmens sur un bain de mercure sec ou sur un bain de mercure couvert d'une petite couche d'eau. Il a fait ses expériences sur les alliages que forme le potassium, avec l'antimoine, le bismuth, le plomb, le fer ou l'étain; et il a constaté, 1° que quand l'un ou l'autre de ces alliages, en tournant sur le mercure, se décompose, soit par l'amalgamation du potassium, soit par son oxidation aux dépens de l'eau qui couvre le bain, il se forme une pellicule noire qui a la propriété singulière d'être attirée par une tige métallique quelconque plongée dans le bain, mais plongée jusqu'au contact du mercure; 2° que cette pellicule est aussi attirée par le fil négatif de la pile et repoussée par le fil positif, ou agitée de l'un à l'autre lorsqu'on les plonge simultanément dans l'eau, ou l'un dans l'eau et l'autre dans le mercure (*Journal de Phys.*, t. XCI et t. XCIII).

M. Herschell a poussé beaucoup plus loin ses ingénieuses recherches sur ce sujet délicat (*Ann. et de Phys. de Chimie.*, t. XXVIII, pag. 280). Il a prouvé par des expériences directes que des parcelles de substances étrangères, par exemple des millionièmes de potassium ou de sodium, suf-

fisent pour modifier complètement les propriétés du mercure exposé à l'influence du courant. En employant, d'après cette indication, du mercure parfaitement pur, voici les phénomènes que l'on observe :

1°. Quatre ou cinq cents grains de mercure, dans un vase en verre ou en porcelaine, sont recouverts d'une couche d'acide sulfurique de quelques lignes d'épaisseur; deux fils de platine formant les pôles d'une pile même très-faible sont plongés dans l'acide; et à l'instant le mercure éprouve une violente agitation. Si les deux pôles sont de chaque côté du globule, à une certaine distance de ses bords, on le voit s'allonger, surtout du côté négatif, et l'on distingue une foule de courans qui sillonnent sa surface en se dirigeant du pôle négatif au positif; en même temps l'acide est lui-même agité, et dans les points où il touche au mercure, il semble comme balayé ou violemment entraîné. Si l'un des fils est verticalement au dessus du mercure, on aperçoit comme un souffle qui détermine des ondulations circulaires, ou d'autres fois une sorte d'attraction qui semble soulever une petite montagne de liquide. Si les deux fils forment une espèce de triangle avec le globule, celui-ci se met à tourner sur lui-même en cheminant obliquement jusqu'à ce qu'il atteigne le fil négatif.

En remplaçant l'acide sulfurique par d'autres acides plus ou moins concentrés ou par des dissolutions salines, on observe des effets analogues qui paraissent ne différer que par leur intensité.

Les dissolutions alcalines concentrées semblent complètement paralyser ces mouvemens; au-dessous d'elle le mercure *exactement purifié*, ou contenant seulement de l'or, de l'argent, du cuivre ou d'autres métaux *électro-négatifs*, n'éprouve aucun des phénomènes que nous venons de décrire; il reste en repos, et la dissolution elle-même ne semble plus agitée que par les bulles gazeuses qui résultent de sa décomposition. C'est en profitant de cette

propriété remarquable que M. Herschell s'est assuré que des atomes de métaux *électro-positifs* sont suffisans pour lui donner une activité très-énergique. Par exemple, sous la dissolution de soude, en touchant le mercure pendant 1″ avec le pôle négatif, il se forme du sodium qui s'amalgame avec lui, et dès cet instant, le courant n'étant plus établi que par la dissolution, le mercure tourne, s'agite, et se trouve sillonné par des courans considérables. L'analyse directe fait voir que dans ce contact si court la quantité de sodium qui peut se former est à peine un millionnième de celle du mercure.

Quand le mercure est en repos sous une dissolution de soude ou de potasse traversée par le courant de la pile, si l'on y porte avec la pointe d'une aiguille un atome d'amalgame de zinc, à l'instant l'agitation commence et les courans se manifestent.

Le plomb, le fer et l'étain jouissent aussi de cette propriété, mais à un moindre degré.

Lorsqu'on fait passer un courant dans le muriate de baryte, avec l'attention de tenir un globule de mercure en contact avec le fil négatif, on aperçoit bientôt, même avec une faible pile, un amalgame de barium qui se forme en belles arborisations; il est solide, cristallise, et se conserve assez facilement. Quelques atomes de cet amalgame, portés dans le mercure qui reste en repos sous une dissolution alcaline, produisent à peu près le même effet que l'amalgame de zinc.

CHAPITRE X.

Des piles sèches.

404. *Construction des piles de Zamboni.* — Dans les piles sèches, les *élémens électro-moteurs* sont encore des substances métalliques; mais le *conducteur* qui sépare les différens couples n'est plus une dissolution liquide; c'est un corps solide quelconque, parfaitement sec, ou légèrement humide, ou imbibé de quelque substance qui ne soit pas absolument imperméable à l'électricité; car il faut toujours que les fluides électriques, développés au contact des métaux, puissent avec le temps circuler dans toute l'étendue de la pile. Entre toutes les dispositions qui ont été successivement indiquées par d'habiles observateurs, celle de M. Zamboni paraît une des plus efficaces. On prend des feuilles de papier ordinaire, un peu fort et humide, autant qu'il pourrait l'être naturellement par un temps pluvieux; d'un côté on colle avec la gélatine, la gomme ou l'amidon, une feuille de zinc laminé et ensuite battu; sur le revers on met du peroxide de manganèse très-bien porphyrisé, en l'étalant à plusieurs reprises avec un bouchon, ou seulement avec un morceau de papier. Alors on superpose dans le même ordre plusieurs feuilles semblables, et, avec un emporte-pièce de 10 à 15 lignes de diamètre, on enlève à chaque fois autant de disques qu'il y a de feuilles. Ces disques sont, à leur tour, superposés dans le même ordre, et l'on fait ainsi des piles de 500, de 1000 ou de 2000 cou-

ples. Pour mieux assurer le contact, on maintient les disques serrés sous une presse, et en même temps, pour les garantir du contact de l'air, on enduit toute la colonne qu'ils forment d'une couche de gomme laque, d'une ou de deux lignes d'épaisseur. A l'extrémité zinc, et en contact immédiat avec le métal, il est bon de mastiquer aussi de la même manière une plaque de zinc un peu épaisse de même diamètre que les disques, sur laquelle on peut visser une boule ou toute autre masse métallique qui forme alors l'un des pôles de la pile; à l'autre extrémité, l'autre pôle est formé par un ajustement pareil fait avec une plaque de cuivre.

Quelquefois on imbibe le papier avec une légère dissolution saline ou bien avec du lait, du miel, du beurre, de l'huile d'œillet, de l'essence de térébenthine, etc.; mais si les piles qui sont faites par ces moyens ont l'avantage de paraître un peu plus fortes dans les premiers instans, elles ont aussi l'inconvénient très-grave de se détériorer promptement, en comparaison des premières: car il est rare qu'après quelques années elles conservent encore toute leur énergie primitive.

Au lieu d'employer le zinc avec l'oxide de manganèse, on peut sans désavantage employer l'étain.

En général, on peut employer deux métaux quelconques, pourvu qu'ils ne soient pas trop voisins l'un de l'autre par leur tendance électrique; par exemple, l'or, l'argent ou le platine ne pourraient être employés ensemble avec succès, parce qu'ils ont à peu près une même énergie électro-négative.

Les premiers essais sur les piles sèches remontent presque au commencement du siècle; en 1803, MM. Hachette et Desormes avaient employé des couples ordinaires de zinc et de cuivre, séparés par de la colle d'amidon. Un peu plus tard M. Biot imagina d'employer comme conducteur le nitrate de potasse fondu, qui est parmi les sels un des

meilleurs conducteurs. En 1809, Deluc présenta à la Société royale de Londres un appareil de 600 paires, composé avec du zinc laminé et du papier cuivré. Enfin Zamboni fit connaître, en 1812, en Italie, et en 1814, à Paris, la pile dont nous venons de donner la description.

405. *Propriétés des piles sèches.* — Une pile de Zamboni, composée par exemple de 2000 paires, ne peut donner la moindre commotion ni produire la moindre décomposition chimique; cependant, si l'on touche l'un des pôles avec un plan d'épreuve, on y prend une charge sensible, et au moyen de la balance électrique on peut comparer entre elles les tensions des différentes piles, ou les tensions que donne une même pile à différentes époques; de même en touchant l'un des pôles pendant un instant, avec le condensateur à taffetas, on obtient une telle charge qu'il est quelquefois possible d'en tirer une forte étincelle. Cette différence si prodigieuse qui se remarque entre une pile de 2000 paires, chargée avec du papier humide, et une pile de 2000 paires pareilles, chargée avec de l'eau acidulée, tient seulement à l'imperfection de la conductibilité des rondelles de papier ou des autres corps qui séparent les différens couples : dans le premier cas, il se produit au contact des métaux tout autant d'électricité que dans le second; mais les fluides ne peuvent se transmettre que lentement pour arriver jusqu'au pôle, et c'est cette lenteur qui détermine les conditions d'équilibre dont nous allons faire l'analyse.

1°. Si la pile est isolée par les deux pôles et abandonnée à elle-même dans de l'air parfaitement sec, les électricités que le contact développe sur tous les élémens se propagent peu à peu au travers du conducteur imparfait, et s'accumulent, l'une au pôle positif, l'autre au pôle négatif. La condition rigoureuse de l'équilibre serait, qu'après un temps suffisamment long, il y eût à chaque pôle autant de tension que dans une pile à conducteur liquide du même

nombre d'élémens; mais, d'une part, le fluide vitré qui vient au pôle positif, par exemple, est arrêté dans son mouvement de propagation par la somme de toutes les résistances qu'il doit vaincre pour arriver jusqu'au dernier élément: d'une autre part, il se perd à mesure qu'il arrive, parce que l'air, même le plus sec, s'électrise au contact des surfaces électrisées; ainsi, la tension cesse d'augmenter, et l'équilibre est établi dès que la quantité de fluide qui arrive, après avoir vaincu toutes les résistances, est égale à la quantité de fluide qui se dissipe par le contact de l'air. A partir de cet instant, la force de la pile sera constante, les fluides paraîtront immobiles et comme fixés à ses deux extrémités; mais il ne faut pas perdre de vue qu'en réalité ils sont sans cesse en mouvement, se perdant toujours par l'air et se reproduisant toujours; c'est un *équilibre mobile* et non pas un équilibre stationnaire.

2°. Il est évident, par ce qui précède, que la même pile, transportée dans de l'air de plus en plus humide, y paraîtra de plus en plus faible, car la cause qui reproduit le fluide reste la même, tandis que la cause qui l'enlève augmente avec l'humidité; il faut donc qu'un nouvel équilibre s'établisse, et il s'établit en effet, lorsque la tension est affaiblie à tel point que l'air humide, en agissant sur cette tension moindre, enlève précisément autant de fluide que l'air sec en enlève en agissant sur une tension plus grande.

3°. Lorsqu'une pile sèche, au lieu d'être abandonnée à elle-même dans l'air sec ou humide, est tellement disposée qu'on lui enlève directement une partie de son fluide, elle présente alors des phénomènes encore plus variés, mais tout aussi faciles à expliquer par les mêmes considérations de l'équilibre mobile. Supposons, par exemple, que l'on dispose à côté l'une de l'autre deux piles de 2000 couples chacune, formant deux colonnes d'environ un pied de hauteur : leurs pôles supérieurs sont, l'un positif, et l'autre

négatif; leurs pôles inférieurs communiquent entre eux par une bande de métal : par cette disposition, les deux piles, en réalité, n'en forment qu'une seule de 4000 couples; car c'est exactement comme si l'on avait pris une pile de 4000 couples, et qu'on l'eût brisée par le milieu en conservant une communication entre les deux sections de rupture. Imaginons maintenant que l'on suspende entre les deux pôles contraires supérieurs, et, à une égale distance, une aiguille métallique légère, parfaitement mobile, et *isolée*. Cette aiguille, également attirée par les deux pôles, n'aura pas de raison pour aller à l'un plutôt qu'à l'autre; elle restera immobile. Mais si une première cause la dérange, elle va, sous certaines conditions, faire *un mouvement perpétuel*. En effet, arrivant, par exemple, au contact du pôle positif, elle s'y charge d'électricité positive, se trouve repoussée par ce pôle et attirée par l'autre, qu'elle vient toucher à son tour; sur celui-ci, elle dépose l'électricité positive qu'elle avait prise au premier, se charge d'électricité négative, se trouve repoussée de nouveau et attirée en sens contraire; elle revient donc au pôle positif, retourne au pôle négatif et ainsi de suite. Une aiguille bien ajustée semble devoir exécuter ces oscillations régulières sans trouble et sans repos, aussi long-temps que l'on voudra. Mais il y a toujours quelque accident qui dérange ou qui arrrête ce mouvement que l'on avait pris d'abord pour une sorte de *mouvement perpétuel*. Dans ce cas, il y a deux causes qui enlèvent l'électricité de la pile, savoir, l'air et l'aiguille; et une seule cause toujours constante qui la reproduit. Si pour un état donné de l'air, l'aiguille est tellement combinée pour sa forme, ses dimensions et la rapidité de ses oscillations, que la somme des quantités de fluides enlevée par elle et par l'air soit justement égale à la quantité de fluide qui se développe dans le même temps, il y aura compensation parfaite; les oscillations seront régulières, isochrones, et se continueront aussi long-temps que

les choses resteront dans cet état. Mais si l'air devient plus sec, les oscillations seront plus rapides; s'il devient plus humide, elles seront plus lentes; et s'il devient plus humide encore, l'aiguille pourra s'arrêter. Voilà comment s'expliquent toutes les singularités bizarres, et pour ainsi dire tous les caprices de l'appareil que nous venons de décrire; on le voit, en effet, marcher tantôt vite, tantôt lentement, s'arrêter par intervalles, puis reprendre sa marche après un temps plus ou moins long. Si même on veut l'arrêter à volonté, rien n'est plus facile; il suffit de souffler sur les pôles, ou de les toucher un instant avec la main ou avec un bon conducteur; car toute la pile se décharge, et il lui faut souvent quelques heures pour reproduire les quantités de fluide capables de déterminer les mouvemens de l'aiguille.

Dans les premiers temps de l'invention de la pile sèche, ces périodes et ces intermittences de mouvement avaient été prises par quelques observateurs pour des signes ou pour des présages liés aux phénomènes météorologiques. Mais l'on voit, par ce qui précède, qu'elles ne sont dépendantes que des variations accidentelles de l'humidité environnante.

406. *Electroscope de Bohnenberger.* — M. Bohnenberger a fait une application des piles sèches qui semble d'abord assez ingénieuse; après avoir supprimé l'une des feuilles d'or du condensateur à lames d'or, il dispose à égale distance de la feuille restante les deux pôles d'une pile très-peu énergique; alors il est évident que la moindre charge d'électricité résineuse ou vitrée détermine cette feuille très-mobile à se porter vers le pôle positif ou vers le négatif, et qu'une fois en mouvement elle doit continuer ses allées et venues pendant un temps plus ou moins long. Mais dans la pratique cet appareil présente de grands inconvéniens; et, je dois l'avouer, jamais je n'ai pu m'en servir avec la moindre confiance. D'abord il est impossible que

l'air de la cloche n'éprouve pas quelques changemens de température; le contact ou même la présence de la main, à une assez grande distance, est une cause suffisante pour modifier la chaleur des parois et pour déterminer des courans d'air qui agitent la feuille d'or et qui la poussent à l'instant vers l'un ou l'autre des pôles. Ainsi l'instrument est infidèle, parce qu'il marche tout seul. Ensuite, les tensions même très-faibles des deux pôles de la pile donnent avec le temps, à l'air de la cloche, des électricités contraires qui ne se recomposent pas subitement; avant d'être recomposées elles peuvent agir par contact ou par influence, et quand elles se recomposent elles excitent dans les molécules gazeuses des mouvemens qui troublent encore l'équilibre instable de la lame d'or.

407. *Diagomètre de Rousseau.* — M. Rousseau, habile amateur des sciences physiques, a fait une autre application des piles sèches qui est tout-à-fait ingénieuse et qui semble devoir être très-utile. Son appareil, qu'il nomme *diagomètre*, est destiné à comparer les conductibilités électriques des différentes substances. Il est représenté dans la *figure* 125; il se compose essentiellement d'une pile sèche plus ou moins énergique et d'une aiguille aimantée qui ne pèse que quelques fractions de grain. Cette aiguille porte un disque de clinquant d', et vers son centre de gravité elle a reçu un petit coup de poinçon qui sert de chape et au moyen duquel elle se met en équilibre stable sur un pivot ik. Son magnétisme la ramène dans une position fixe, et sa légèreté lui permet de quitter cette position par l'influence des plus faibles forces; un arc divisé marque les différens degrés de déviation qu'elle éprouve. Un conducteur métallique $gtvlk$ reçoit l'électricité en g, où il a la forme d'un disque ou d'une tablette, et il la transmet d'une part au pivot ki, et d'une autre part au petit plan d qui se trouve en présence de l'aiguille et à une très-petite distance

de son disque d'. L'appareil est porté sur un gâteau de résine ou de gomme laque gg' et recouvert d'une cloche nn'. La pile sèche p qui doit servir de source constante d'électricité, est pareillement établie sur un gâteau de résine; au moment de l'expérience on fait communiquer l'un de ses pôles avec le sol, et l'on conduit le fluide de l'autre sur la tablette g au moyen du fil fn qui est revêtu de gomme laque et terminé par une petite boule n en platine. Dès que cette petite boule est mise en contact direct avec le disque g, l'aiguille est repoussée, et par la déviation qu'elle éprouve l'on peut comparer entre elles les tensions de la pile à diverses époques. Ensuite, pour comparer les conductibilités électriques des différens conducteurs imparfaits, on les interpose simplement entre la boule et le disque g, et l'on observe les déviations correspondantes. Il est bien entendu que l'on ne peut comparer ainsi que des corps solides de même forme et de même dimension, à moins que l'on n'ait, par des expériences préalables, déterminé les corrections à faire. Pour les liquides les comparaisons sont plus faciles, on en met successivement des volumes égaux dans un petit godet de métal h qui repose sur le disque g, et l'on prend soin de faire toucher la boule exactement de la même manière.

M. Rousseau a obtenu, avec son diagomètre, des résultats remarquables sur la conductibilité des charbons de différentes espèces, et surtout sur la conductibilité des huiles.

Les charbons qui sont employés avec le plus de succès dans la fabrication de la poudre sont en général les plus mauvais conducteurs.

Entre toutes les huiles et toutes les graisses soumises à l'épreuve du diagomètre, l'huile d'olive *parfaitement pure* est celle qui offre la moindre conductibilité. Mais si l'on verse seulement deux gouttes d'huile de faîne ou d'œillette dans dix grammes d'huile d'olive, la conductibilité en est

très-sensiblement augmentée. De cette manière, M. Rousseau découvre les moindres traces de sophistication dans les huiles du commerce, et l'on peut dire qu'il supplée d'une manière ingénieuse et commode à l'imperfection des moyens chimiques.

FIN DU LIVRE QUATRIÈME.

LIVRE CINQUIÈME.

DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER.

De l'action des courans sur les aimans.

408. *Découverte de l'électro-magnétisme.* — En 1820 M. Œrsted, professeur à Copenhague, fit la découverte fondamentale sur laquelle repose *l'électro-magnétisme*; on savait déjà que dans certaines circonstances les puissantes décharges électriques affectent l'aiguille aimantée; on avait observé sur des vaisseaux frappés du tonnerre que les aiguilles de boussole perdaient la propriété de marquer la route du bâtiment, et même qu'elles pouvaient la perdre dès que le feu Saint-Elme brillait au dessus des mâts avec une grande intensité, sans qu'il y eût explosion de la foudre. Les unes étaient dépouillées de leur magnétisme, d'autres avaient leurs pôles renversés, et d'autres enfin étaient devenues *folles*, c'est-à-dire qu'elles avaient reçu des points conséquens qui leur imprimaient une fausse direction. Plusieurs physiciens, parmi lesquels on peut citer Franklin, Beccaria, Wilson et Cavallo, avaient essayé de reproduire ces phénomènes par la décharge d'une bouteille de Leyde ou par celle d'une grande batterie, et ils étaient en effet parvenus à modifier le magnétisme des aiguilles très-petites, soit en les mettant dans le circuit de l'explosion, soit en

les exposant simplement à quelque distance de l'étincelle; mais ces expériences n'ayant pu produire aucun phénomène régulier, on se contenta d'admettre que le choc électrique agissait alors comme le choc du marteau, et le sujet fut abandonné. Un peu plus tard on fit, avec l'électricité de la pile, quelques nouveaux essais qui ne furent pas plus heureux que les premiers. Enfin, M. OErsted, guidé par des vues profondes sur l'essence même des fluides électriques, et sur la cause primitive des affinités de la matière, trouva le moyen de faire agir l'électricité sur le magnétisme d'une manière sûre et permanente. Le mode d'action une fois découvert et défini avec précision, les phénomènes fondamentaux se présentèrent d'eux-mêmes à M. OErsted; une immense carrière fut ouverte à tous les savans, et jamais peut-être on ne vit, dans une si courte période, tant de phénomènes se développer et se succéder, et la science s'enrichir de tant de vérités nouvelles.

Pour que les fluides électriques agissent sur le magnétisme, il suffit d'une seule condition : il suffit qu'ils soient en mouvement.

En effet, un fil conducteur étant traversé par le courant de la pile, si on en approche une aiguille aimantée librement suspendue, on la voit qui se dévie, qui se tourne, s'agite et qui fait une foule d'oscillations sans être attirée ni repoussée, à moins qu'elle ne soit très-près. C'est la première expérience de M. OErsted. Lorsqu'on voit une action si vive, qui se fait sentir encore, même à la distance de plusieurs pieds, on s'étonne que, parmi tant d'expériences qui ont été faites avec la pile, le hasard n'ait pas une seule fois offert à l'observation un phénomène de cette nature.

La force qui produit ces mouvemens dans l'aiguille est ce que l'on appelle la *force électro-magnétique*.

Il est facile de constater, par l'expérience,

1°. Qu'elle diminue à mesure que la distance augmente entre le courant et l'aiguille;

2°. Qu'elle s'exerce dans tous les sens et au travers de toutes les substances, excepté au travers des substances magnétiques.

De plus, elle est une force active, ne s'exerçant pas seulement sur le magnétisme libre de l'aiguille, mais s'exerçant aussi sur le magnétisme combiné, pour le décomposer quand elle peut vaincre la force coercitive. M. Arago a le premier démontré cette vérité par une expérience curieuse. Lorsqu'on présente de la limaille de fer à un fil conducteur pendant qu'il est traversé par le courant, on la voit qui s'enroule autour de lui, non pas en se hérissant sur sa surface, comme elle fait sur les aimans, mais en se couchant transversalement, de manière à former des espèces d'anneaux concentriques qui l'enveloppent. La couche de limaille dépend de la force de la pile; elle a quelquefois trois ou quatre millimètres d'épaisseur, et dès qu'on arrête le courant, elle se détache et tombe subitement. Ainsi, la force électro-magnétique s'exerce sur le fer doux pour décomposer son magnétisme naturel; nous verrons plus tard qu'elle s'exerce pareillement sur l'acier, et qu'elle est très-énergique pour surmonter les forces coercitives les plus considérables.

Voici maintenant quelques suppositions qui nous seront utiles pour caractériser les phénomènes d'une manière plus commode et plus précise : nous admettrons dans le courant une *direction* déterminée, et nous la définirons en disant qu'il va toujours du pôle positif au pôle négatif en passant par le conducteur qui joint les pôles; ainsi, quand les communications sont établies, et que le mouvement électrique s'accomplit dans tout le circuit de la pile, nous dirons, en parlant de l'arc $z\,a$ qui touche au pôle positif, que le courant le traverse en passant de z en a (*Fig.* 132); pareillement $a\,a'$, est traversé de a en a', $a'\,a''$ de a' en a'',

et enfin $c\,z$ de c en z; et en considérant le circuit complet, nous dirons toujours que le courant va de c en z en passant par la pile, et de z en c en passant par le conducteur. Nous désignerons souvent le courant par les formes et par les dimensions du conducteur qu'il traverse; quand il passe par un conducteur rectiligne, nous l'appellerons *courant rectiligne*; par un fil très-fin, *courant linéaire*; par un cylindre creux, *courant cylindrique*; par un fil courbe, *courant curviligne*; par un cercle, *courant circulaire*; par un conducteur indéfini dans sa longueur, *courant indéfini*; par un conducteur rentrant sur lui-même et formant un circuit complet, *courant fermé*, etc.; aucune de ces expressions ne doit être prise à la lettre; quand nous disons qu'il y a un courant dans le conducteur qui joint les deux pôles de la pile, nous ne voulons nullement faire entendre qu'il y a dans ce conducteur un mouvement de translation du fluide vitré depuis le pôle positif jusqu'au pôle négatif, et mouvement de translation du fluide résineux en sens inverse; car il est probable, au contraire, comme nous l'avons déjà indiqué plusieurs fois, que la recomposition des électricités se fait autour de toutes les molécules pondérables et dans tous les intervalles qui les séparent. De même, quand nous disons que le courant a une direction depuis le pôle positif au pôle négatif, nous ne voulons pas faire entendre que les fluides électriques se meuvent seulement suivant l'axe du fil conducteur, sans éprouver de déviations latérales ou obliques à cet axe; mais dans un conducteur donné les effets n'étant pas les mêmes, si l'on touche l'une de ses extrémités a avec le pôle positif, et l'autre extrémité a''' avec le pôle négatif, ou si on le touche dans un ordre inverse, il faut bien pouvoir exprimerdans quel ordre les communications sont établies, et c'est ce que l'on fait d'une manière commode, en disant que dans le premier cas le courant se dirige de a en a''', et de a''' en a dans le second.

409. *Le courant tend à tourner l'aiguille en croix avec lui, le pôle austral à gauche.* — La *figure* 133 représente une aiguille aimantée B A, au dessus de laquelle passe horizontalement un courant rectiligne cc′, situé dans le plan du méridien magnétique, et dirigé de c en c′; l'aiguille est chassée hors de sa direction primitive; son pôle *austral* est poussé à *l'occident*, et après quelques oscillations elle s'arrête dans la position B′ A′, éprouvant ainsi une déviation mesurée par l'arc AA′. Cette déviation augmente ou diminue suivant que l'on abaisse le courant pour l'approcher plus près de l'aiguille, ou qu'on le relève pour l'en éloigner.

Les choses étant ramenées au premier état, si de nouveau l'on approche le courant, mais en le retournant pour qu'il aille en sens contraire de c′ en c, comme il est marqué par la petite flèche ponctuée, l'aiguille éprouve encore les effets de sa présence, alors son pôle *austral* est poussé à *l'orient*, et c'est dans la position B″A″ qu'elle vient s'arrêter,

Ainsi, *au dessus* de l'aiguille, le courant dévie le pôle austral à l'occident quand il va lui-même du sud au nord, et il le dévie à l'orient quand il vient au contraire du nord au sud.

On peut répéter les mêmes expériences en faisant passer le courant *au dessous* de l'aiguille, toujours horizontalement et dans le plan du méridien magnétique : alors, chose surprenante, les effets sont précisément inverses, c'est-à-dire que le pôle austral est poussé à l'orient quand le courant va du sud au nord, et poussé à l'occident quand il vient du nord au sud.

Dans ces phénomènes la force électro-magnétique est combattue par l'action directrice que la terre exerce sur l'aiguille, et pour observer l'effet seul de cette puissance nouvelle qui agit d'une manière si énergique et en même temps si singulière, il est nécessaire de neutraliser la force

terrestre : c'est ce que l'on peut faire de plusieurs manières, comme nous l'avons indiqué (303), soit avec un barreau placé horizontalement dans le plan du méridien magnétique, et sur le prolongement de l'aiguille, soit en ajoutant sur le même axe deux aiguilles de même force, ayant leurs pôles tournés en sens inverse, soit en employant l'aiguille astatique (*Fig.* 23); avec ces précautions on découvre le vrai caractère de la force électro-magnétique, on voit qu'elle n'est ni une force attractive, ni une force répulsive, mais une force *directrice* qui tourne toujours l'aiguille perpendiculairement au fil conducteur, sans attirer un pôle de préférence à l'autre, c'est-à-dire que la ligne des pôles est toujours *en croix* avec le courant. Pour prendre une idée plus nette de cette direction, concevons un cylindre creux, d'une longueur quelconque, et, par exemple, d'un pied de diamètre; suivant l'axe de ce cylindre, imaginons un fil conducteur traversé par le courant, et sur sa surface une aiguille aimantée qui puisse se mouvoir librement dans tous les sens, l'effet de la force électro-magnétique sera telle, que l'aiguille se mettra toujours tangentiellement au cylindre, et transversalement à ses arêtes; ou, en d'autres termes encore, si du milieu de l'aiguille, on abaisse une perpendiculaire sur le courant, l'aiguille, dans son équilibre sous l'influence de la force électro-magnétique, sera elle-même perpendiculaire au plan qui passe par cette perpendiculaire et par le courant. Ce n'est pas assez de définir ainsi la direction de l'aiguille; il faut encore assigner la position de ces pôles, déterminer de quel côté se trouve le pôle boréal, de quel côté l'austral, soit que le courant se propage dans un sens ou dans l'autre. Dans les premiers temps on éprouvait de grands embarras pour exprimer en peu de paroles ces rapports de position et de direction qui se compliquent de mille manières; mais M. Ampère a levé toutes ces difficultés au moyen d'une comparaison qui semblera peut-être aussi bizarre qu'elle est ingé-

nieuse. M. Ampère ne se contente pas de donner une direction au courant, il lui donne encore une *tête*, des *pieds*, une *droite* et une *gauche;* il en fait un homme. Concevons dans une portion quelconque du fil conducteur une petite figure d'homme couchée dans le sens de la longueur, les pieds du côté du pôle zinc, et la tête du côté du pôle cuivre, de telle manière que, d'après notre définition précédente, le courant entre par les pieds et sorte par la tête; concevons que cette figure ait *toujours* la face tournée vers le milieu de l'aiguille sur laquelle agit le courant, alors l'effet est tel, que l'aiguille se trouve *en croix*, comme nous venons de le voir, et toujours son pôle austral vers la gauche de la petite figure d'homme; ce que nous exprimons en disant qu'elle se tourne en croix avec le courant, son pôle austral à gauche. Cette espèce de formule singulière offre une image facile, qui supplée à une foule de paroles; ceux qui voudront l'appliquer à toutes les expériences que nous avons déjà citées, n'auront pas besoin d'un long exercice pour reconnaître qu'elle est en même temps très-fidèle et très-commode. Nous trouverons dans la suite quelques circonstances où elle semble être en défaut; mais il suffira alors d'une courte interprétation pour montrer qu'elle est toujours exacte.

410. *L'intensité de l'action du courant est en raison inverse de la simple distance.* — Cette loi fondamentale a été démontrée par MM. Biot et Savart par une série d'expériences que nous allons rapporter. La figure 134 représente la coupe horizontale de l'appareil; A B est une aiguille aimantée, semblable aux petites aiguilles d'épreuve dont nous avous parlé (311); elle est suspendue à un fil de cocon au moyen d'une petite chape de cuivre, et se trouve abritée de l'agitation de l'air par une cloche en verre. L'action de la terre est neutralisée par un barreau convenablement placé, en sorte que cette aiguille n'a plus de orce directrice; elle est indifférente et prête à obéir

sans résistance aux nouvelles forces que l'on fait agir sur elle; enfin, c représente la section d'un gros fil de cuivre de huit ou dix pieds de long, tendu verticalement et traversé par un courant, tantôt de haut en bas, tantôt de bas en haut; pour fixer les idées, nous supposerons que le courant est ascendant: ce fil, toujours vertical, peut être porté à diverses distances de l'aiguille, qui, dans toutes ses positions, correspond sensiblement au milieu de sa longueur. D'après la loi que nous venons d'indiquer, l'aiguille se met en croix avec le courant, le pôle austral à gauche, comme le représente la figure; mais pour peu qu'on l'écarte de cette position, elle y revient par des oscillations isochrones, dont la durée dépend de l'énergie de la force électro-magnétique. Le nombre des oscillations faites dans un temps donné, la distance du courant et l'intensité de la force qu'il exerce, sont donc trois choses liées entre elles.

Dans une première expérience, soit D la distance du courant au milieu *m* de l'aiguille, E l'intensité de la force qu'il exerce, et N le nombre des oscillations qui s'exécutent dans un temps donné, dans 1′ par exemple :

Dans une deuxième expérience, soient D′, E′ et N′, les quantités analogues.

Les intensités des forces qui produisent des oscillations isochrones étant toujours entre elles comme les carrés des nombres d'oscillations, exécutées dans le même temps, nous aurons (311) :

$$\frac{E}{E'} = \frac{N^2}{N'^2}.$$

Ainsi, après avoir observé les oscillations, il nous sera facile de comparer les intensités des forces. Voici le tableau des résultats qui ont été obtenus par MM. Biot et Savart.

Ordre des observations.	Distance du courant au centre de l'aiguille.	Durée de dix oscillations.
1	30mm	42″25
2	40	48,85
3	30	42,00
4	20	33,50
5	30	41,00
6	50	54,75
7	30	42,25
8	60	56,75
9	30	41,75
10	120	89,00
11	30	42,50
12	15	30,00
13	30	43,15

On voit dans ce tableau plusieurs observations faites à la même distance, parce que, l'activité de la pile étant soumise à de grandes variations, même dans un temps assez court, il était nécessaire de la plonger et de la retirer souvent, et par conséquent de revenir souvent à la même distance pour reconnaître si la force avait une constance suffisante.

Avec ces données il est facile de découvrir la loi de l'intensité suivant les variations de la distance; on voit au premier coup d'œil que pour une distance double la force devient sensiblement moitié moindre; et si l'on pose en général

$$\frac{E}{E'} = \frac{D'}{D},$$

on en déduira

$$\frac{N^2}{N'^2} = \frac{D'}{D}$$

ou

$$N' = N\sqrt{\frac{D}{D'}}$$

ou $$T' = T\sqrt{\frac{D'}{D}}$$

en désignant par T et T′ les durées de 10 oscillations. Or, en prenant pour D la distance de 30 millimètres, pour T la valeur correspondante, et pour D′ les autres distances successives, on obtient des valeurs de T′ assez peu différentes de celles qui ont été données par l'expérience : ces valeurs calculées sont rassemblées dans le tableau suivant, à côté des valeurs observées.

ORDRE des observations.	DISTANCE du courant au centre de l'aiguille.	DURÉE DE 10 OSCILLATIONS		EXCÈS du calcul.
		calculée.	observée.	
2	40mm.	48″62	48″85	−0″23
4	20	33,88	33,50	+0,38
6	50	53,74	54,75	−1,01
8	60	59,40	56,75	+2,65
10	120	84,25	89,00	−4,75
12	15	30,99	30,00	+0,99

Les différences entre le calcul et l'observation sont assez faibles pour que l'on puisse les attribuer aux variations inévitables qu'éprouve l'activité de la pile pendant la durée des expériences. Nous pouvons conclure, par conséquent, que *l'intensité de la force électro-magnétique est en raison inverse de la simple distance.*

Mais il ne faut pas perdre de vue que, d'après la disposition de l'appareil, le courant est rectiligne et d'une longueur que l'on peut regarder comme indéfinie par rapport à la longueur de l'aiguille, et surtout par rapport à sa distance; c'est sous ces conditions seulement que la loi est vraie. M. de Laplace a démontré que la force électro-ma-

gnétique élémentaire, c'est-à-dire celle qui est exercée par une seule section du courant, est *en raison inverse du carré de la distance*, comme toutes les autres forces connues, et proportionnelle au sinus de l'angle formé par la direction du courant et par la ligne menée du milieu de cette section au milieu de l'aimant. En effet, en calculant d'après ce principe la somme de toutes les actions élémentaires qui sont exercées sur une petite aiguille, par un courant rectiligne indéfini, on trouve que l'intensité de cette résultante totale doit diminuer, comme l'expérience l'indique, c'est-à-dire en raison inverse de la distance.

Il résulte encore, de cette même loi de la force élémentaire, que l'intensité de l'action d'un courant angulaire indéfini, tel que BAB′ (*Fig.* 144) sur une aiguille *ab*, est en raison inverse de la distance *a* A, comme celle d'un courant rectiligne, mais qu'elle est proportionnelle à la tangente de la moitié de l'angle B A Z; ainsi, en prenant pour unité l'intensité de l'action de RR′ sur l'aiguille *ab*, l'intensité de l'action de B A B′ serait représentée par

$$tang\frac{1}{2}\text{BAZ}.$$

C'est ce que M. Biot a aussi vérifié par l'expérience; et l'on voit que, si le courant B A B′ se redresse au point de se confondre avec RR′, il arrive que, l'angle B A Z étant alors un angle droit, la tagente de $\frac{1}{2}$ B A Z devient égale à l'unité, comme cela doit être.

Les courans rectilignes ou angulaires que nous employons dans nos expériences ne peuvent jamais être indéfinis, et par conséquent ne peuvent jamais donner des résultats mathématiquement conformes aux lois que nous venons d'indiquer; mais cependant la connaissance de ces lois, sur lesquelles repose toute la théorie, est même indispensable

dans la pratique pour donner une idée au moins approximative de l'intensité des forces qui sont en jeu.

Quand les courans suivent des lignes courbes de différentes formes, il faut nécessairement recourir à des calculs plus ou moins compliqués pour déterminer, par les lois précédentes, l'intensité des phénomènes qu'ils doivent produire.

411. *Conditions d'équilibre d'une aiguille aimantée soumise à l'action d'un courant rectiligne indéfini.* — Dans un mémoire présenté à l'Académie des sciences, en 1822, imprimé par extrait dans les *Annales de chimie* (t. XXI, p. 77), et dans le *Précis élémentaire* de M. Biot, j'essayai d'établir, par un grand nombre d'expériences, un principe général au moyen duquel on peut expliquer et même calculer tous les phénomènes électro-magnétiques résultant de l'action mutuelle qui s'exerce entre les aimans et les courans. Les faits nombreux qui étaient alors sans liaison furent enchaînés pour la première fois, et les nouvelles recherches qui ont été faites depuis sont venues se rattacher au même principe, et donner ainsi autant de confirmations de son exactitude. M. Œrsted avait remarqué que le courant placé à une très-petite distance des aiguilles exerce sur elles des actions singulières, qu'il les attire ou les repousse suivant sa position, et que d'autres fois il les tourne en sens contraire, c'est-à-dire le pôle austral à *droite*. M. Faraday sut tirer de ce phénomène une découverte importante, dont nous parlerons bientôt, celle de la *rotation* des aimans; mais on ne savait pas la cause de ces alternatives, et pour ainsi dire de ces renversemens de la force électro-magnétique. Pour la découvrir, je dirigeai mes expériences en cherchant surtout à distinguer les actions séparées du courant sur chacun des pôles de l'aiguille : car on pouvait supposer, ce qui est en effet la vérité, que le courant agit toujours de la même manière sur le même pôle, et que les changemens d'attraction en

répulsion provenaient sans doute de quelques circonstances qui rendaient prédominante tantôt l'action de l'un des pôles, tantôt celle de l'autre.

C'est en faisant ainsi l'analyse de toutes les forces que je fus conduit au principe suivant : l'action qui s'exerce entre un courant rectiligne indéfini et le pôle d'un aimant forme un système de deux forces parallèles, égales et contraires, composant un couple; ces forces sont perpendiculaires au courant et perpendiculaires à la plus courte distance du courant au pôle de l'aimant, et leur direction est telle que le pôle austral est toujours poussé à gauche, et le pôle boréal toujours à droite; l'intensité de ces forces est en raison inverse de la distance du courant au pôle de l'aimant. Ce principe est encore vrai lorsqu'on l'applique à une petite section quelconque d'un courant, et alors le couple est perpendiculaire à la ligne qui joint le centre de cette section au pôle de l'aimant, et son intensité, toujours en raison inverse de la distance, est proportionnelle au sinus de l'angle que la direction de cette ligne fait avec la direction du courant. Par exemple, si nous considérons une aiguille AB (*Fig.* 135) et un courant ascendant perpendiculaire au plan de la figure, dont la coupe est représentée en C, l'action totale de ce courant sur le pôle austral A formera le système des deux forces AP et CP_1, la première désignant l'action et l'autre la réaction ou *vice versâ;* de même, entre le courant et le pôle B, il y aura un autre couple BP′ et CP'_1. Si le courant est fixe et l'aiguille mobile, les deux forces AP et BP′ pourront seules produire du mouvement; leur intensité relative, leur obliquité et la longueur des bras de leviers par lesquels elles agissent, déterminent alors le sens de la rotation ou la position d'équilibre. Cela posé, on peut résoudre par le calcul ce problème général, qui embrasse toute la théorie de l'électromagnétisme proprement dit, c'est-à-dire, tous les phénomènes produits par l'action mutuelle des courans sur les

aimans, ou des aimans sur les courans. Étant donné un courant de forme quelconque, fixe, ou mobile autour d'un point ou autour d'un axe connu, et un aimant à deux ou à plusieurs pôles, pareillement mobile autour d'un point ou autour d'un axe, déterminer les mouvemens et les positions d'équilibre de l'aimant et du courant. Pour indiquer la marche des calculs, je rapporterai, dans la note suivante, un seul cas particulier très-simple, qui a l'avantage d'offrir plusieurs résultats qui se présenteront souvent dans les expériences.

Soit AX et AY, deux axes rectangulaires, *fig.* 135;

A le pôle austral d'une aiguille;

B son pôle boréal;

λ sa longueur ou plutôt la distance de ses pôles;

M son milieu;

F un axe fixe, autour duquel elle peut tourner, et dont l'abscisse est X;

C la position d'un courant, supposé perpendiculaire au plan des axes, et dont les coordonnées sont x et y.

Si on désigne par 1 l'intensité de la force qu'il exerce à la distance 1 pour faire tourner le pôle austral à gauche et le pole boréal à droite,

Alors,

$$\text{A est sollicité par} \begin{cases} \dfrac{\cos. a}{CA}, \text{ qui tend à faire tourner;} \\ \dfrac{\sin a}{CA}, \text{ qui tend à faire glisser;} \end{cases}$$

$$\text{B est sollicité par} \begin{cases} \dfrac{\cos. b}{CB}, \text{ qui tend à faire tourner;} \\ \dfrac{\sin b}{CB}, \text{ qui tend à faire glisser;} \end{cases}$$

Si l'axe est fixe, l'aiguille ne pourra glisser, et pour qu'elle ne tourne pas il suffit que deux conditions soient remplies :

1°. Que les deux forces $\dfrac{\cos a}{CA}$ et $\dfrac{\cos b}{CB}$ agissent dans le même sens, si F est entre les pôles, et en sens contraire s'il est au dehors;

2°. Que ces forces soient en raison inverse des bras de levier X et $\lambda - X$.

L'équation d'équilibre est donc

$$\frac{\dfrac{\cos a}{CA}}{\dfrac{\cos b}{CB}} = \frac{\lambda - X}{X}, \text{ ou } \frac{\dfrac{x}{\sqrt{y^2 + x^2}}}{\dfrac{\lambda - x}{\sqrt{y^2 + (\lambda - x)^2}}} = \frac{\lambda - X}{X}$$

où $$y^2 = \frac{x(X-x)(\lambda-x)}{\lambda - X - x}.$$

Cette équation est le lieu des points où il faut placer le courant pour qu'il n'imprime à l'aiguille aucune déviation; les courbes qu'elle représente changent de nature quand X change de grandeur, c'est-à-dire suivant que l'axe de rotation est entre les pôles ou exactement sur l'un d'eux, ou sur le prolongement de la ligne qui les joint. Il est facile de les discuter et de les construire dans ces différens cas.

Premier cas. — L'axe de rotation est au milieu de l'aiguille.

On a $$X = \frac{\lambda}{2}.$$

L'équation devient $$y^2 = \frac{x(\lambda - 2x)(\lambda - x)}{\lambda - 2x}$$ et se décompose en deux $$\begin{cases} \lambda - 2x = 0 \\ y^2 + x^2 - \lambda x = 0. \end{cases}$$

La première est celle d'une ligne droite, LL', *fig.* 136, perpendiculaire à l'aiguille et passant par son milieu;

La deuxième est celle d'un cercle A*s*B*s'*, *fig.* 136, qui a son centre au milieu de l'aiguille, et qui a pour rayon $\frac{\lambda}{2}$, ou la moitié de sa longueur.

Voilà les courbes où l'action du courant change de signe; elles sont les limites où la force attractive devient répulsive, et *vice versâ*, et cela ne tient pas, comme on le voit, à un renversement de la force, mais simplement à la différence de ses intensités sur les deux pôles de l'aiguille.

Il est facile à présent de calculer tous les effets du courant, soit qu'il se trouve sur ses limites, ou au dehors ou au dedans.

1°. Si le courant est placé sur la ligne droite ou sur le cercle, il n'agit plus pour faire tourner l'aiguille, mais il agit encore pour l'attirer ou la repousser parallèlement à elle-même, ou pour imprimer à son centre un mouvement plus ou moins oblique à sa direction.

Quand le courant est sur la droite, les deux forces $\frac{\sin a}{CA}$ et $\frac{\sin b}{CB}$ sont toujours égales et contraires et ne produisent nul effet, si ce n'est pour ramener l'aiguille par une série d'oscillations; mais les deux forces $\frac{\cos a}{CA}$ et $\frac{\cos b}{CB}$, qui sont pareillement égales, agissent dans le même sens, et donnent lieu à une résultante unique qui a pour intensité

$$\frac{2\cos a}{CA} = \frac{4\lambda}{4y^2+\lambda^2};$$

cette résultante est appliquée au centre de l'aiguille et agit toujours suivant ML, *fig.* 136, soit que le courant se trouve sur ML', soit qu'il se trouve sur ML Cette force est donc répulsive dans le premier cas, et attractive dans le second; son intensité est en raison directe de la longueur λ, et en raison inverse du carré de la distance quand λ^2 est très-petit, par rapport à y^2.

Quand le courant est sur le cercle, les deux forces $\frac{\cos a}{CA}$ et $\frac{\cos b}{CB}$ sont encore égales et donnent une résultante unique, qui est alors $\frac{2}{\lambda}$, et qui ne cesse pas d'agir suivant ML; elle se combine avec la différence des forces $\frac{\sin a}{CA}$ et $\frac{\sin b}{CB}$, qui est $\frac{\lambda - 2x}{\lambda y}$, et qui agit suivant MA, pour $x < \frac{\lambda}{2}$, et suivant MB pour $x > \frac{\lambda}{2}$. Leur résultante est $\frac{1}{y^2}$ et on voit qu'elle agit tantôt pour amener le milieu de l'aiguille vis-à-vis le courant, tantôt pour l'en repousser.

2°. Si l'on place le courant hors des limites, et dans un point quelconque de l'espace qui environne le cercle, soit à droite soit à gauche de la perpendiculaire LL', *fig.* 136, alors la force de rotation du pôle austral et celle de pôle boréal ne peuvent plus se détruire, et l'aiguille est toujours forcée de tourner. La force qui produit ce mouvement étant exprimée par

$$\frac{(y^2+x^2-\lambda x)(2x-\lambda)}{(y^2+x^2)(y^2+(\lambda-x)^2)},$$

on voit qu'elle est toujours négative pour $x < \frac{\lambda}{2}$, c'est-à-dire quand le courant est à gauche de LL', d'où il suit que dans toutes ces positions la force du pôle boréal est celle qui donne le sens au mouvement; et comme elle agit toujours du même côté de ML, il en faut conclure que l'aiguille est sans cesse sollicitée à tourner du même côté, et qu'elle ne s'arrête en position stable que quand la direction de LM arrive sur le courant.

Au contraire, pour $x < \frac{\lambda}{2}$, c'est-à-dire quand le courant est à droite de LL', la différence des forces est toujours positive, et celle du pôle austral l'emporte toujours sur celle du pôle boréal; ainsi l'aiguille est encore forcée de tourner, et par un mouvement inverse elle arrive encore à la même

position de stabilité. Ce résultat est précisément celui des premières expériences de M. OErsted; mais le calcul montre que tous les renversemens d'action; que ces attractions du pôle austral qui se changent si vite en répulsion quand le courant passe de l'autre côté, ou, comme on dit, quand il le regarde par une autre face; que ce détour qu'il prend pour gagner sa position de stabilité, en décrivant trois quadrans au lieu d'un seul qu'il pourrait décrire pour arriver au même point; enfin que tous les mouvemens de l'aiguille, qui paraissent si singuliers, quand on ne considère que l'action d'un seul pôle, deviennent des choses simples et parfaitement claires quand on considère l'action comme elle est, dans la réalité, et qu'on tient compte des modifications qu'elle éprouve sur un pôle et sur l'autre.

Quand l'aiguille est arrêtée dans sa position de stabilité, et qu'on l'en écarte, elle y revient par une série d'oscillations.

Il est facile de voir maintenant quelles forces produisent ces mouvemens et quelles lois elles suivent, à raison de la longueur de l'aiguille; soit h, *fig.* 136, la position du courant, et $k\lambda$ sa distance au milieu M de l'aiguille: ces phénomènes se passent, comme si, pendant ses oscillations, le point h décrivait un arc de cercle GG', dont le rayon est $k\lambda$, et l'intensité de l'action du courant est la même que si, laissant l'aiguille en repos, on le faisait passer sur les divers points de GG'.

L'équation de ce cercle est

$$y^2 + x^2 - \lambda = \lambda^2 \frac{(4k^2 - 1)}{4}.$$

L'intensité de la force, qui est en général

$$\frac{(y^2 + x^2 - \lambda x)(2x - \lambda)}{(y^2 + x^2)(y^2 - (\lambda - x)^2)},$$

devient donc

$$\frac{\lambda^2 \frac{(4k^2 - 1)}{4} (2x - \lambda)}{\left(\lambda x + \lambda^2 \frac{(4k^2 - 1)}{4}\right)\left(\lambda^2 - \lambda x + \lambda^2 \frac{(4k^2 - 1)}{4}\right)}$$

et en faisant

$$x = \frac{\lambda}{2} - k\lambda\alpha$$

$$\frac{- 2k\lambda\alpha \frac{(4k^2 - 1)}{4}}{\lambda^2 \frac{(4k^2 + 1)}{4}^2 - \alpha^2\lambda^2 k^2}$$

dont la valeur approchée, quand k est très-grand, se réduit à $\frac{2\alpha}{\lambda k}$.

Ainsi, l'intensité de la force que le courant exerce sur l'aiguille pour la faire osciller, est bien en raison inverse de la longueur de l'aiguille, et en raison inverse de sa distance au milieu des deux pôles; mais elle ne suit rigoureusement cette progression décroissante qu'en supposant le courant placé à une distance très-grande, par rapport à la distance des pôles. Quand M. Biot a déterminé par l'expérience cette loi fondamentale, il a fait usage d'une aiguille très-courte, et n'a pu reconnaître les irrégularités dont je parle; s'il n'avait pas été conduit par d'autres raisons à choisir une très-petite aiguille et à la placer très-loin du courant, il aurait vu qu'à une distance plus petite que la demi-distance des pôles, il n'y a pas oscillation, mais renversement de l'aiguille; qu'à une distance égale à la demi-distance des pôles, la force d'oscillation est exactement nulle; que les forces qui font osciller à deux distances, dont l'une est égale à la longueur de l'aiguille et l'autre double de cette longueur, au lieu d'être entre elles comme 2 à 1, sont entre elles comme 283 est à 250; que les forces qui font osciller à deux distances, dont l'une est double de l'aiguille et l'autre quadruple, sont entre elles comme 1,9 est à 1. En général le rapport de ces forces pour deux distances $k\lambda$ et $k'\lambda$ étant exprimé par

$$\frac{k(4k^2-1)(4k'^2+1)^2}{k'(4k'^2-1)(4k^2+1)^2},$$

il ne peut devenir $\frac{k'}{k}$ que par k très-grand, comme dix ou vingt fois la longueur de l'aiguille.

3°. Si le courant est placé dans l'intérieur des limites où l'action est nulle, c'est-à-dire au dedans du cercle $AsBs'$, alors il arrive comme au dehors des limites, que les deux forces qui tendent à produire les rotations, cessant d'être égales et du même côté, font en effet tourner l'aiguille sur son axe. Mais la différence de ces forces

$$\frac{(y^2+x^2-\lambda x)(2x-\lambda)}{(y^2+x^2)(y^2+(\lambda-x)^2)},$$

au lieu d'être négative à gauche de ss', est maintenant positive, et réciproquement; en sorte qu'au dedans du cercle l'action est précisément inverse de ce qu'elle est au dehors, et ce renversement n'a pas lieu seulement pour le sens de rotation de l'aiguille, il se montre encore pour sa position de stabilité qui est sur Ms', et non plus sur sL; ainsi, pour qu'une aiguille mobile autour de son centre, soit en équilibre en présence du courant, il faut que celui-ci soit placé quelque part sur le cercle ou sur la droite; s'il

est sur le cercle, l'équilibre est indifférent; s'il est sur la droite, l'équilibre est stable, depuis l'infini jusqu'à l'entrée du cercle en s, instable sur toute la longueur du rayon sM, stable sur le rayon Ms', et instable enfin depuis S jusqu'à l'infini.

Deuxième cas. L'axe de rotation est entre l'un des pôles et le milieu de l'aiguille.

Alors, $$X > \frac{\lambda}{2} \text{ et } < \lambda.$$

Quand l'axe de rotation est placé entre le milieu de l'aiguille et l'un de ses pôles, le pôle boréal, par exemple, il y a encore deux courbes limites, qui sont l'une et l'autre symétriques, par rapport à l'aiguille. La première est indéfinie dans le sens des y et très-resserrée dans le sens des x; la seconde est fermée dans tous les sens, et la distance entre l'axe et le pôle boréal est l'un de ses diamètres. Il y a ici une remarque curieuse; c'est qu'autour du pôle boréal il se trouve un petit espace où toutes les actions semblent contraires.

Après avoir tracé les courbes, il est facile de discuter, comme dans le cas précédent, les positions de stabilité ou d'instabilité, et de déterminer les intensités des forces pour toutes les positions.

Troisième cas. L'axe de rotation est au pôle boréal de l'aiguille.

Alors, $$X = \lambda.$$

Dans ce cas, les deux courbes précédentes se réduisent, l'une à l'axe des y, et l'autre à un point unique, qui est le pôle boréal ou le point fixe lui-même, *fig.* 137. Il faut donc, pour que l'équilibre ait lieu, que le courant soit placé quelque part sur la ligne Y Y′ ou au point B. On pouvait le prévoir d'avance, car la force du pôle boréal étant toujours détruite, et celle du pôle austral restant seule pour imprimer du mouvement à l'aiguille, il faut bien qu'elle soit dirigée suivant sa longueur pour la laisser en repos, et par conséquent que le courant soit placé sur la perpendiculaire, menée par le pôle austral.

Si on le place ailleurs, l'aiguille est obligée de chercher une position d'équilibre, en tournant autour de son axe. Pour savoir où elle doit s'arrêter, on trace le cercle qu'elle décrirait par une révolution complète, et, par le courant, on mène les tangentes à ce cercle; les deux points de tangence sont les points où doit être le pôle austral pour l'équilibre; au point qui est à gauche l'équilibre est stable, et il est instable au point qui est à droite. Les phénomènes se passent autrement quand le courant est dans l'intérieur du cercle : il attire ou repousse l'aiguille, suivant sa situation; dans le premier cas, elle arrive au contact par le plus court chemin, et s'y arrête; dans le second cas, elle tourne pour s'éloigner; mais ne trouvant sur toute la circonférence un seul point de repos, elle la décrit tout entière, et se retrouve

ainsi en contact avec le courant par le côté opposé, et se presse contre lui parce qu'il y a attraction.

La matière du fil que suit le courant est donc la seule cause qui puisse, dans ce cas, arrêter l'aiguille et l'empêcher de tourner indéfiniment; ainsi, un courant immatériel, comme celui qui traverse le vide, imprimerait à l'aiguille suspendue de cette manière un mouvement de rotation perpétuel : il y a même un point unique où le courant ordinaire produirait le même effet; c'est au pôle boréal, par lequel passe l'axe de rotation.

Quatrième cas. L'axe de rotation est au delà du pôle boréal.

Alors, $X > \lambda$.

L'équation représente encore deux courbes comme dans le deuxième cas, l'une indéfinie et l'autre fermée : il y a seulement cette différence que les courbes sont renversés ; la première s'est tournée du côté des x négatives, et la seconde a passé au delà du pôle boréal, de telle sorte que la distance entre ce pôle et l'axe de rotation forme son grand diamètre.

Cinquième cas. L'axe de rotation est placé à une distance infinie.

Alors, $X = \infty$.

L'équation est celle d'une hyperbole équilatère, dont l'axe est l'aiguille elle-même; ainsi, quand on place le courant sur un point de l'hyperbole, soit sur une courbe soit sur l'autre, il n'exerce aucune action pour faire tourner l'aiguille.

Si on le place dans l'intérieur de la courbe, il y a rotation, et pour savoir dans quel sens elle se fait, il suffit de prendre la différence des forces qui agissent perpendiculairement à l'aiguille, aux deux pôles A et B.

412. *Multiplicateur de Schweiger.* — Peu de temps après la découverte de M. OErsted, M. Schweiger imagina le *galvanomètre*, que l'on appelle aussi *multiplicateur*, parce qu'il multiplie en effet la force électro-magnétique, et qu'il est d'une sensibilité merveilleuse pour découvrir les moindres traces de l'électricité en mouvement. Le multiplicateur repose sur ce principe, qu'un courant circulaire ou polygonal, ou ayant en général une forme rentrante quelconque, agit par toutes ses parties pour diriger, dans le même sens, une aiguille aimantée qu'il enveloppe de toutes parts. Par exemple, toutes les parties du courant qui parcourt les côtés du carré *pqron* (*Fig.* 142) agissent de la même manière sur une aiguille qui serait mobile autour du centre *c* de la figure, et qui pourrait se tourner

perpendiculairement à son plan. Le côté pq tend à tourner le pôle austral en avant de la figure, et le pôle boréal derrière; il en est de même du côté qr, du côté no et du côté on: ainsi, l'aiguille devra se tourner avec beaucoup d'énergie perpendiculairement au plan du courant, le pôle austral en avant. Un deuxième circuit de même intensité, allant dans le même sens, produit sur elle un effet égal; il en serait de même d'un troisième, d'un quatrième... d'un centième : donc un fil conducteur enroulé sur lui-même et formant cent tours, doit, quand il est traversé par le même courant, produire un effet cent fois plus grand qu'un fil d'un seul tour : seulement, il faut que les fluides parcourent toutes les circonvolutions du fil sans passer latéralement d'un contour à l'autre; c'est une condition facile à remplir. On prend pour cela un fil d'argent ou de cuivre rouge de quinze ou vingt aunes de longueur, de quelque fraction de millimètres d'épaisseur, et revêtu d'un fil de soie dont les tours sont tellement serrés que l'on n'aperçoit plus le métal; on l'enroule sur un petit cadre en bois, $mnop$ (*Fig.* 138), à peu près comme du fil sur une bobine; seulement, on laisse libre un ou deux pieds de longueur à chaque extrémité; c'est ce qu'on appelle *les deux fils du multiplicateur*; le courant doit entrer par l'un et sortir par l'autre : ces deux fils sont représentés dans la figure par fg et ig'; l'aiguille aimantée ab, qui doit servir d'index, est suspendue à un fil de cocon s, et tout l'appareil est recouvert d'une cloche nn' qui le garantit des agitations de l'air. Lorsqu'on veut faire une expérience on tourne le cadre dans la direction du méridien magnétique : l'aiguille est alors dans le plan du cadre, et l'effet du courant la dévie de cette position d'un angle plus ou moins grand, suivant qu'il est plus ou moins énergique; dans cette position la force électromagnétique est combattue par la force magnétique de la terre, qui agit incessamment sur l'aiguille, pour la ramener dans le méridien magnétique.

Pour donner au multiplicateur toute la sensibilité dont il est susceptible, il faut trouver le moyen d'augmenter la force électro-magnétique, et de diminuer la force directrice de la terre, sans toutefois la détruire; car si l'aiguille était soumise à la seule action du courant, les forces les plus faibles, comme les plus énergiques, l'ameneraient toujours dans la même position, et l'on n'aurait plus aucun moyen de faire la comparaison des intensités.

La force directrice de la terre peut être diminuée en diminuant l'énergie de l'aiguille aimantée; mais alors la force électro-magnétique serait elle-même diminuée dans le même rapport, puisqu'elle résulte de l'action mutuelle du courant et de l'aiguille. Au contraire, si l'on suspend les deux aiguilles à pôles opposés ab et $a'b'$, l'une dans l'intérieur du cadre et l'autre en dehors, soit au dessus, soit au dessous, la force directrice de la terre sera diminuée à volonté, ou même exactement neutralisée, et en même temps la force électro-magnétique sera augmentée, car le courant agit sur ces deux aiguilles pour les tourner dans le même sens. Deux aiguilles dans le cadre, et deux au dehors, donneront encore un effet plus sensible, puisqu'on pourra, par leur moyen, d'une part, réduire ou compenser exactement la force directrice de la terre, et, de l'autre, faire agir le courant toujours dans le même sens sur une quantité de magnétisme libre beaucoup plus grande. C'est cette dernière disposition qui est représentée dans la *figure* 138, dessinée d'après l'appareil excessivement sensible de M. Lebaillif.

Les quatre aiguilles sont plantées perpendiculairement dans un petit brin de paille, qui est lui-même attaché au fil de cocon; puisqu'elles se meuvent ensemble, il suffit d'un seul cercle divisé pour observer leur déviation commune; ce cercle doit être adapté près de l'aiguille supérieure.

La même figure représente encore un autre perfection-

nement très-utile : au lieu d'un fil ayant, par exemple, 300 pieds de longueur, on emploie cinq fils parallèles, ayant chacun 60 pieds; à chaque extrémité ces fils sont dépouillés de la soie qui les couvre, réunis en un petit faisceau et pressés l'un contre l'autre dans un assez grande longueur. De cette manière, le courant qui se présente pour traverser le multiplicateur se divise en cinq parties, et coule pour ainsi dire par cinq canaux; il semble, au premier coup d'œil, qu'en supprimant l'un de ces fils, la portion du fluide qui le traversait va se reporter sur les quatre fils restans, et qu'on obtiendra le même effet, mais il n'en est pas ainsi : une source électrique étant donnée, un fil de métal ne peut l'épuiser, la quantité de fluide qui le traverse est sensiblement proportionnelle à sa section, et deux fils pareils laissent passer sensiblement deux fois autant de fluide qu'un seul; par conséquent, si l'on supprimait l'un des cinq fils du multiplicateur, on perdrait à peu près la cinquième partie de l'effet. D'une autre part, la conductibilité est, comme nous le verrons plus loin, à peu près en raison inverse de la longueur des fils; ainsi, en augmentant le nombre des tours du même fil, on se donne à la vérité un plus grand nombre de forces qui agissent sur l'aiguille, mais chacune d'elles devient plus petite, tellement que, si la conductibilité était rigoureusement en raison inverse de la longueur, le multiplicateur ne multiplierait pas, puisque, deux tours d'un même fil exigeant une longueur double, la force réelle du courant serait réduite à moitié, et l'on aurait 2 forces égales à $\frac{1}{2}$, au lieu d'une force égale à 1; on n'y gagnerait rien.

Le multiplicateur est un instrument sûr et commode pour constater le développement de l'électricité par le contact des corps, et même pour déterminer l'espèce d'électricité qui appartient à chacun d'eux.

Par exemple, pour voir l'électricité qui se développe au contact du zinc et du cuivre, on adapte un petit disque de

zinc à l'un des fils, et à l'autre un disque de cuivre pareil; sur l'un de ces disques on met une rondelle de papier mince, mouillée d'eau pure, et ensuite on les approche en les pressant l'un et l'autre contre la rondelle; à l'instant l'aiguille du multiplicateur est vivement agitée, elle pourrait même décrire plusieurs circonférences avant de s'arrêter, tant est énergique l'action qu'elle éprouve. Ce n'est pas au contact des disques que se développe l'électricité, puisqu'ils sont séparés par la rondelle mouillée, mais c'est au contact du zinc avec le fil de cuivre. Pour reconnaître que le zinc prend la vitrée, et le cuivre la résineuse, il suffit de remarquer que le courant qui traverse le multiplicateur entre en effet par l'extrémité du fil à laquelle est adapté le disque de cuivre.

En substituant au disque de zinc un disque d'un autre métal quelconque, on reconnaîtra de la même manière l'espèce d'électricité qu'il développe par son contact avec le fil de cuivre.

Pour déterminer les électricités qui se développent au contact de deux autres substances quelconques, par exemple, du zinc et de l'argent, il faut prendre une précaution de plus : il faut alors mettre du zinc à l'une et à l'autre extrémité du fil, placer la rondelle mouillée sur l'un de ces zincs, la lame d'argent sur la rondelle mouillée, et enfin l'autre zinc sur la lame d'argent; puis observer le sens de la déviation de l'aiguille, pour distinguer le métal qui est positif et celui qui est négatif. Le tableau suivant contient l'ordre des tendances électriques que j'ai observées, par cette méthode, dans différens corps; chacun est électro-positif avec tous les suivans, et électro-négatif avec tous les précédens.

1 { Zinc,
  { Mercure,

2 { Zinc,
  { Étain,
  { Mercure,

3 Zinc,
4 { Plomb 1, / Mercure 4,
5 Alliage de d'Arcet,
6 Soudure,
7 Plomb,
8 { Étain 1, / Mercure 10,
9 { Bismuth 1, / Étain 20,
10 Étain,
11 Caractères d'imprim.,
11 Fer,
13 Acier,
14 { Antimoine 1, / Fer 2,
15 { Bismuth 1, / Mercure 4,
16 Antimoine pur,
17 Bismuth,
18 Laiton,
19 Cuivre,
20 Bronze,
21 Sulfure d'antimoine,
22 Métal de cloches,
23 Arsenic,
24 { Antimoine 1, / Cuivre 2,
25 { Étain 1, / Antimoine,
26 Mercure,
27 Sulfure de bismuth,
28 Phosphure de cuivre,
29 Antimoine,
30 Plombagine,
31 Sulfure de cuivre,
32 Sulfure de plomb,
33 Phosphure de fer,
34 Argent,
35 Or,
36 Tellure,
37 Palladium,
38 Platine.

Il arrive souvent que la tension électrique, produite par l'action chimique d'un conducteur humide sur un métal, est plus forte que celle qui est produite par le contact de ce métal avec un autre. Aussi l'acide sulfurique étendu et l'acide nitrique donnent plus de tension lorsqu'ils agissent sur le zinc, que ce métal n'en donne quand il touche le plomb, l'argent et plusieurs autres conducteurs. L'acide nitrique avec l'étain en donne plus aussi que l'étain avec le plomb; les alcalis en donnent plus avec l'antimoine, que l'antimoine avec un grand nombre d'autres corps, etc.

Il résulte de là que l'ordre précédent semble changer avec la nature du conducteur humide que l'on emploie;

car pour tel conducteur, c'est l'électricité développée au contact des métaux qui l'emporte, et qui détermine le sens du courant; pour tel autre conducteur, au contraire, c'est l'électricité dégagée par son action sur un des métaux, qui devient prédominante et qui change la direction primitive. Ainsi, l'étain semble passer avant le plomb, quand le conducteur humide est l'acide sufurique, ou l'acide hydrochlorique, ou la potasse. L'antimoine vient se placer avant l'acier quand le conducteur humide est un alcali; et plusieurs autres corps de la série éprouvent des déplacemens plus ou moins considérables, suivant la nature du conducteur que l'on emploie; mais en déterminant, autant qu'il est possible, dans des expériences aussi délicates, les rapports de tension qui existent entre les électricités produites par les actions chimiques et celles qui sont produites par les actions électro-motrices ordinaires, on arrive à reconnaître, d'une manière assez sûre, que l'électricité développée au contact des métaux, est celle qui l'emporte, et qui agit sur l'aiguille. Ainsi, le tableau précédent ne présente pas de grandes erreurs dans la série qu'il renferme.

Au reste, une très-petite différence dans la composition d'un corps peut produire un effet sensible sur la place qu'il occupe : par exemple, l'antimoine pur ne diffère de l'antimoine du commerce que par une très-petite quantité de soufre, et l'on voit cependant que ces deux corps sont à une distance assez grande.

Nous verrons plus tard que le multiplicateur est un instrument précieux pour reconnaître les électricités qui se développent dans la plupart des combinaisons chimiques.

413. *De l'aimantation par le courant de la pile et par les décharges électriques.* — Puisqu'une aiguille aimantée se tourne perpendiculairement à la direction du courant, il est naturel de supposer qu'une aiguille de fer ou d'acier prendra d'autant plus de magnétisme qu'elle sera plus rap-

prochée de cette position. En effet, un courant n'aimante que très-faiblement les aiguilles qui lui sont parallèles, tandis qu'il aimante avec beaucoup de force, et souvent même à saturation, les aiguilles de substances magnétiques qui sont tournées en croix avec lui, comme elles se tourneraient si elles étaient préalablement aimantées. D'après ce principe, il est évident que pour développer, avec un courant donné, des quantités de magnétisme de plus en plus grandes, il faut le faire agir non-seulement sur le milieu de l'aiguille, mais encore sur toutes les sections transversales, et à des distances de plus en plus petites. Pour remplir ces conditions, l'on enroule un fil de métal en *hélice*, sur un tube de verre (*Fig.* 139), on place l'aiguille dans ce tube, et l'on fait passer le courant de l'une à l'autre extrémité du fil de l'hélice; un seul instant suffit pour qu'il développe tout le magnétisme qu'il est capable de développer dans ces circonstances; car, après un contact qui n'a que la durée de l'étincelle, l'aiguille disposée dans le tube perpendiculairement au plan du méridien magnétique, se trouve aimantée aussi fortement qu'après un contact de plusieurs minutes. La rapidité ou plutôt l'instantanéité avec laquelle le courant peut vaincre la résistance de la force coercitive est un phénomène très-remarquable.

On distingue deux espèces d'hélices : l'hélice *dextrorsùm* (*Fig.* 139), dans laquelle le fil s'enroule vers la *droite*; et l'hélice *sinistrorsùm* (*Fig.* 140), dans laquelle il s'enroule vers la gauche; en supposant, toutefois, qu'on les tienne de la même manière; mais pour en donner une idée plus juste, il suffit de dire que le *tire-bouchon* ordinaire et toutes les vis sont des hélices *d'extrorsùm*.

Dans l'hélice *dextrorsùm*, le pôle boréal de l'aiguille est toujours à l'extrémité par laquelle entre le courant, ou bien à l'extrémité positive du fil; et dans l'hélice *sinistrorsùm* c'est, au contraire, le pôle austral de l'aiguille qui se trouve à l'extrémité positive.

Lorsqu'on fait, sur le même tube, plusieurs hélices contraires, à la suite l'une de l'autre (*Fig.* 140), l'aiguille offre alors, dans son magnétisme, *un point conséquent* à la jonction des deux hélices; ainsi chacune d'elles agit encore comme si elle était seule.

Avec une hélice deux fois renversée (*Fig.* 141), on aurait deux points conséquens, et ainsi de suite. Si l'on faisait de la sorte une hélice à *pas* très-petits, et composée alternativement d'un tour *dextrorsùm* et d'un tour *sinistrorsùm*, on produirait sur l'aiguille aimantée une distribution de magnétisme très-singulière; ou plutôt l'effet définitif serait tel, qu'elle semblerait avoir conservé son état naturel.

L'électricité de la machine électrique, en passant par le fil d'un multiplicateur pour se rendre dans le sol, ou pour se recomposer avec celle des coussins, ne produit que de faibles déviations sur l'aiguille. Avec un multiplicateur de cinq cents tours, M. Colladon a obtenu une déviation de 18°, au moyen d'une machine assez forte; l'un des fils de l'appareil communiquait aux coussins, et l'autre, aiguisé en pointe, était maintenu à un décimètre de distance des conducteurs (*Ann. de Chimie*, t. XXXIII, pag. 62); en portant la pointe à deux décimètres, à 4, à 8 et à 10, la déviation devenait moindre, et se trouvait sensiblement en raison inverse de la distance. Dans une autre expérience, l'un des fils touchant aux conducteurs positifs d'une machine de Nairne, et l'autre aux conducteurs négatifs, la déviation fut de 35°, pour trois tours de manivelle par seconde; elle paraissait sensiblement proportionnelle à la vitesse de rotation.

M. Colladon a encore observé des effets analogues, en déchargeant *lentement* des batteries plus ou moins fortes au travers du multiplicateur; la rapidité de la décharge dépend ici, comme dans la machine, de la distance à laquelle on approche la pointe qui termine l'un des fils de l'appareil. Dans toutes ces expériences le courant allait,

comme dans la pile, de l'électricité positive à la négative; on pouvait juger de sa direction par le sens de la déviation de l'aiguille.

L'aimantation par l'électricité ordinaire donne naissance à plusieurs phénomènes curieux que nous allons examiner,

1°. Le courant *direct* que l'on obtient en faisant communiquer les conducteurs avec les coussins, ne produit que de très-faibles effets, lorsqu'il passe simplement par un fil droit. Les aiguilles, même très-fines, que l'on expose transversalement à une petite distance de ce fil, ne s'aimantent pas quand le courant est *continu*, mais elles commencent à prendre des quantités sensibles de magnétisme, lorsqu'on fait passer le courant par petites étincelles; leur magnétisme augmente, quand les étincelles deviennent plus fortes et partent de plus loin; enfin l'action du courant de la machine, comme celle du courant de la pile, s'augmente au moyen des hélices; alors, de vives étincelles produisent beaucoup d'effet sur les aiguilles qui sont dans le tube de l'hélice, et même M. Ridolfi est parvenu, par ce moyen, à développer du magnétisme avec un courant continu.

2°. Les décharges des bouteilles de Leyde, et des batteries, ont une puissance magnétique considérable, soit qu'elles traversent des fils droits, soit qu'elles traversent des hélices, à pas plus ou moins serrés (*Fig.* 139, 140 et 141). D'abord on avait obtenu, par l'un et l'autre moyen, des résultats identiques à ceux que produit la pile : on avait trouvé que près des fils droits, les aiguilles transversales s'aimantent, le pôle austral à gauche; et que dans les tubes des hélices elles s'aimantent, le pôle austral à l'extrémité négative pour les hélices *dextrorsùm*, et à l'extrémité positive pour les hélices *sinistrorsùm*. C'est en effet ce qui arrive assez souvent; mais M. Savary a découvert plusieurs phénomènes remarquables, qui semblent établir

une différence fondamentale entre le courant continu de la pile et les *chocs électriques* des batteries (*Ann. de Chimie*, t. XXXIV).

Quand le choc est transmis par *un fil droit*, des aiguilles égales, parallèles, placées transversalement du même côté du fil et à des distances différentes, ne sont point aimantées dans le même sens. Les unes sont aimantées *positivement*, c'est-à-dire que leurs pôles sont disposés comme ceux d'une aiguille aimantée d'avance, qui serait libre de se mouvoir sous l'action d'un courant paisible et continu passant par le fil, tandis que les autres sont aimantées *négativement*, c'est-à-dire en sens contraire des premières. Voici, par exemple, le résultat d'une expérience : La décharge passe par un fil de platine de $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre, dont la longueur tendue en ligne droite est de 1 mètre. Les aiguilles, trempées raides, ont $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre, et 15 millimètres de longueur; elles sont au nombre de 27, placées du même côté du fil, loin de ses extrémités, et perpendiculaires à sa longueur, de manière que les verticales de leurs centres tombent sur sa direction ; en même temps elles sont dans des plans verticaux différens, afin que l'on puisse établir entre elles des distances assez grandes pour de très-petites différences de distance au fil.

Numéros des aiguilles.	Distance au fil.	Durée de 60 oscillations.	Sens de l'aimantation.
1	0,0mm	1′. 3″	+
2	1,1	2. 29	—
3	2,0	sans aimantation.	
4	3,0	1. 26	+
5	4,3	1. 6	+
6	5,5	1. 3	+
7	6,7	1. 14	+
8	8,0	1. 32	+
9	8,6	3. 8	—
10	9,6	1. 35	—
11	10,5	1. 17	—

Numéros des aiguilles.	Distance au fil.	Durée de 60 oscillations.	Sens de l'aimantation.
12	12,3mm	1′. 1″	—
13	13,5	56	—
14	14,6	56	—
15	15,7	59	—
16	16,9	1. 3	—
17	18,2	1. 5	—
18	19,1	1. 17	—
19	20,0	1. 34	—
20	20,9	2. 29	—
21	21,4	presque nulle.	
22	23,3	1. 24	+
23	32,7	41	+
24	44,0	34	+
25	70,0	43	+
26	100,0	1. 12	+
27	180,0	1. 28	+

La décharge était faible ; les aiguilles aimantées à saturation par de forts barreaux, faisaient 60 oscillations en 23″; ainsi la vingt-quatrième qui a reçu la plus forte charge magnétique, était loin encore de son *maximum*.

M. Savary a reconnu que ces alternatives, et les distances auxquelles elles se manifestent, dépendent, pour ainsi dire, de tous les élémens qui concourent au phénomène ; savoir, de l'intensité de la décharge, de la longueur du fil tendu en ligne droite, de son diamètre, de l'épaisseur des aiguilles, et de leur force coercitive. En général, les fils très-fins, et les forces coercitives très-faibles, présentent des alternatives moins nombreuses ; souvent même avec ces conditions l'aimantation est toujours positive, et les périodes ne sont plus marquées que par des différences d'intensité.

Quand le choc est transmis par des *fils roulés en hélice*, sur des tubes de verre ou de bois, il exerce encore des effets analogues sur des aiguilles successivement placées dans

l'axe des tubes. Alors la seule variation d'intensité dans la charge de la batterie peut avoir une grande influence. Par exemple, un fil de laiton de $0^{mm},18$ de diamètre, et de $0^{m},8$ de longueur, ayant été roulé en hélice sur un cylindre de bois sec de $6^{mm},5$ de diamètre, et de 90^{mm} de longueur, le pas de l'hélice ayant 3 millimètres, on a fait passer quatorze décharges d'intensités toujours croissantes sur quatorze aiguilles pareilles, de 15 millimètres de longueur, et de $\frac{1}{4}$ de millimètre d'épaisseur, placées successivement dans l'axe du cylindre, et les résultats ont été les suivans : les signes + et — indiquent, comme précédemment, le sens de l'aimantation; le temps marqué dans la colonne est la durée de 60 oscillations; la première aiguille est celle qui a reçu le premier choc, la deuxième, celle qui a reçu le deuxième, etc.

Première. . . .	+ 26″	Huitième. . . .	— 33″
Deuxième.. . .	+ 57	Neuvième. . . .	— 58
Troisième.. . .	— 38	Dixième. . . .	+ 28
Quatrième. . .	— 25	Onzième. . . .	+ 23
Cinquième. . .	+ 29	Douzième. . . .	+ 35
Sixième.. . . .	+ 27	Treizième. . . .	— 1′ 15
Septième. . . .	— 42	Quatorzième. . .	+ 31

En général, pour des fils plus longs, et pour des fils plus minces, le nombre des alternatives diminue : un fil d'argent de $\frac{1}{40}$ millimètre de diamètre, et de $0^{m},25$ de longueur, formant pareillement une hélice dont le pas est de 3 millimètres, ne donnent plus d'alternatives, depuis les plus faibles charges, jusqu'à celles qui sont capables de le vaporiser; dans ce dernier cas, les aiguilles sont encore aimantées, et même jusqu'au point de saturation.

Enfin M. Savary a constaté, par de nombreuses expériences, un autre phénomène qui me semble mériter toute l'attention des physiciens. La quantité de magnétisme que prend une aiguille sous l'influence d'une décharge électri-

que, et même le sens de son aimantation, dépendent de la nature et des dimensions des corps qui la touchent ou qui l'enveloppent. Dans une hélice pareille aux précédentes, et traversée par une décharge électrique, une aiguille ne peut plus prendre de magnétisme quand elle est enveloppée d'un cylindre de cuivre assez épais : à mesure que l'épaisseur diminue, le magnétisme devient sensible, et pour une épaisseur assez petite il devient plus considérable qu'il ne serait pour une aiguille nue et isolée dans l'axe de l'hélice. L'étain, le fer et l'argent placés autour de l'aiguille, lui donnent des propriétés analogues, c'est-à-dire, qu'en feuilles très-minces, ils la rendent plus apte à recevoir le magnétisme, et qu'en cylindres suffisamment épais, ils lui ôtent tout-à-fait la propriété d'être aimantée par le choc électrique. Des cylindres de limaille métallique ne produisent pas cet effet, tandis que des couches concentriques, alternativement métalliques et non métalliques, le produisent; d'où il semble résulter que les solutions de continuité perpendiculaires à l'axe de l'aiguille, ou à l'axe des cylindres, ont une grande influence sur leurs propriétés.

Des plaques plus ou moins épaisses, mises en contact avec une aiguille qui est disposée convenablement près d'un fil droit, pour recevoir l'influence d'une décharge, peuvent aussi, suivant leurs dimensions, modifier la quantité de magnétisme que prend cette aiguille, et le sens de son aimantation.

Tous ces phénomènes paraissent dépendre de l'action subite que le choc électrique produit, soit directement sur les molécules qu'il rencontre, soit latéralement sur les molécules qui sont éloignées de son cours.

414. *De la rotation des aimans par l'influence des courans.* — Le phénomène curieux de la rotation des aimans par l'action des courans a été indiqué par le Dr Wollaston et démontré par M. Faraday, à une époque où l'on n'avait encore que des notions très-incomplètes sur les forces électro-

magnétiques (*On electro-magnetical motions and the theory of magnetism*, septembre 1821). Maintenant toutes les particularités de ces mouvemens peuvent être présentés comme des conséquences du principe général dont nous avons essayé de donner une idée (411).

Voici d'abord le détail des expériences : une large éprouvette en verre $v v'$ (*Fig.* 158) est remplie de mercure jusqu'à une petite distance de ses bords; un aimant cylindrique AB, lesté avec un contre-poids de platine P, se tient debout dans le mercure, de manière que son pôle A s'élève de quelques millimètres au dessus du niveau (cet aimant est représenté un peu plus en grand dans la *figure* 154); une tige t, que l'on peut élever ou baisser à volonté au moyen d'une vis de pression, vient plonger dans le mercure par son extrémité inférieure, tandis qu'elle communique par son autre extrémité avec un conducteur en cuivre C qui communique lui-même avec l'un des pôles de la pile; enfin le conducteur c' qui tient à l'autre pôle, passe sur le bord de l'éprouvette et plonge dans le mercure très-près de son contour extérieur. Dès que la communication est établie, l'aimant tourne dans le même sens d'un mouvement plus ou moins rapide et fait des révolutions successivement autour de la tige t; il a bien quelque tendance à venir la toucher et à tourner alors plus rapidement; mais, avec quelques soins, il est facile de l'ajuster pour qu'il se maintienne à distance. La *fig.* 152 représente une coupe horizontale, ou plutôt une vue de la surface du mercure : c est la section du courant, A celle de l'aimant, et A, A', A'' la circonférence qu'il décrit dans ses révolutions; les flèches indiquent le sens du mouvement, en supposant que le pôle austral soit en haut et que le courant monte par la tige.

La longueur de l'aimant étant de 7 à 8 pouces, il est évident que le pôle inférieur B n'éprouve qu'une action insensible, soit de la part du courant vertical qui traverse la tige t, soit de la part du courant à peu près horizontal qui

glisse sur la surface du mercure. Ainsi la cause du mouvement se trouve dans le pôle A. Les deux courans dont nous venons de parler le sollicitent diversement : celui qui passe par la tige, et que nous supposons ascendant, agit sans cesse pour le pousser à gauche, et détermine ainsi le mouvement de rotation que l'on observe; celui qui passe sur le mercure agit aussi pour favoriser ce mouvement quand le pôle A se trouve dans la demi-circonférence A″A (*Figure* 152), et pour le diminuer quand il se trouve dans la demi-circonférence opposée; mais ses effets sont très-faibles et suffisent à peine pour modifier la vitesse de rotation. Quand on change la direction du courant, le mouvement s'arrête et recommence bientôt en sens inverse, et quand on change les pôles de l'aimant, on observe aussi sur le pôle boréal des mouvemens contraires à ceux que donne le pôle austral.

Le mercure offre une si grande résistance, qu'il faut un puissant appareil et un aimant très-fort, sous un petit volume, pour produire un mouvement de rotation régulier et un peu rapide. Mais on peut disposer l'expérience d'une autre manière, qui donne toujours une grande vitesse, même avec des piles ordinaires de 10 à 12 couples. Cette disposition est représentée dans la *figure* 159. La petite cavité qui se trouve à l'extrémité de l'aimant, et par laquelle il peut se visser sur le contre-poids en platine, forme une espèce de petite coupe *g* (*Fig.* 154), que l'on remplit de mercure; on abaisse la pointe de la tige *t* de manière qu'elle plonge dans ce mercure sans toucher à l'aimant, qui conserve ainsi toute sa mobilité; ensuite on établit les communications avec les deux pôles de la pile comme dans l'expérience précédente. Le courant arrive, par exemple, dans la coupe P′, monte par la lame de cuivre *l′*, traverse le conducteur C′, passe dans le mercure, monte par l'aimant lui-même, de là dans la tige, et s'en va, par le conducteur C, par la lame de cuivre *l*, se rendre dans la coupe négative P.

Alors l'aimant tourne sur lui-même comme une toupie, avec une grande vélocité. La *figure* 153 représente une coupe de l'appareil faite sur la surface du mercure, et les flèches indiquent le sens de la rotation en supposant que le courant soit ascendant et que le pôle austral de l'aimant soit en haut. En retournant les pôles ou en changeant la direction du courant on obtient des mouvemens contraires.

L'explication de ce phénomène repose encore sur les mêmes principes; le courant qui monte par l'aimant exerce sur son pôle supérieur des actions qui se détruisent; mais les actions réciproques que le pôle exerce sur les diverses parties du courant donnent naissance à autant de forces qui agissent dans le même sens pour faire tourner le système. En d'autres termes, les phénomènes se passent comme si le courant, au lieu de traverser la substance de l'aimant, traversait une couche conductrice isolée qui l'enveloppât de toutes parts. En effet, je me suis assuré que, si l'on entoure l'aimant d'une substance non conductrice pour le mettre ensuite dans une sorte d'étui en cuivre mince, et qu'on répète l'expérience précédente, on obtient exactement les mêmes résultats. Or, dans cette nouvelle disposition, le courant étant de toutes parts symétrique autour du pôle de l'aimant, il est clair que la somme des actions qu'il exerce sur lui se détruisent comme étant opposées deux à deux et appliquées au même point, tandis que la réaction du pôle sur chaque filet vertical du courant donne des forces opposées deux à deux, dont les effets s'ajoutent pour faire tourner dans le même sens, parce que ces forces sont appliquées à la circonférence au lieu d'être appliquées au centre.

On avait supposé d'abord que les portions du courant qui passent sur le mercure étaient la cause de la rotation de l'aimant; mais voici des expériences par lesquelles je me suis assuré que ces courans n'entrent pour rien dans le phénomène.

La première consiste à percer la tige *t* dans toute sa longueur, ensuite on fixe, avec de la cire, un fil de soie au fond de la cavité de l'aimant, on le fait passer par l'ouverture centrale de la tige, et on l'attache à quelque point fixe en lui donnant une longueur convenable (*voyez* en F, *Fig.* 154). L'aimant ainsi suspendu, on fait passer autour de lui un anneau qui ne le touche pas tout-à-fait, mais qui en approche assez près pour qu'une goute de mercure reste dans l'intervalle, adhérente d'un côté au contour de l'anneau, et de l'autre à la surface de l'aimant. Alors, en faisant communiquer l'anneau à l'un des pôles de la pile, au pôle positif, par exemple, le courant passe dans la goutte de mercure, monte dans l'aimant, arrive à la tige et de là se rend au pôle négatif. Cette disposition offre l'avantage de faire passer le courant par telle partie de l'aimant que l'on juge convenable; car on peut faire monter ou descendre l'anneau dans toute sa longueur, et l'on observe ainsi que l'effet *maximum* est produit quand l'anneau est au milieu à égale distance des pôles, qu'il est nul quand l'anneau est tout à-fait en bas, et nul encore un peu avant qu'il soit arrivé tout en haut.

La seconde expérience est représentée dans la *fig.* 157. A B est un aimant cylindrique enveloppé d'une feuille de papier ou d'une couche de vernis non conducteur; il est enfermé dans un étui en cuivre très-mince *cc'*, qui porte en son milieu une espèce de volant *vv'*, et à ses extrémités des bouchons *bb'* dans l'axe desquels sont fixés des tourillons en acier *tt'*; ces tourillons reposent sur le tranchant de deux lames de métal *mm'*, ajustées pour recevoir en même temps quelques gouttes de mercure, afin de mieux établir les communications. Le bord du volant plonge aussi dans le mercure que contient la coupe *c*. L'un des pôles de la pile communiquant à la lame *m'*, et l'autre à la coupe *c*, le courant s'établit; il passe dans le tourillon *t'*, dans la partie *c'* de l'étui de cuivre, dans le volant, dans la coupe,

et de là à l'autre pôle de la pile. Alors l'aimant prend un mouvement de rotation très-rapide, qui change de direction quand on fait passer le courant en sens contraire.

Dans cette expérience, le système prend encore son mouvement par la réaction que le pôle exerce sur le courant qui traverse l'étui de cuivre. Cependant je dois ajouter que M. Ampère explique ces phénomènes d'une autre manière, au moyen d'une théorie mathématique, dont nous verrons les principes dans les chapitres suivans.

CHAPITRE II.

De l'action de la Terre et des Aimans sur les Courans.

415. *Direction des courans par l'influence du magnétisme de la terre.* — Quand on eut constaté l'action des courans sur les aimans, on ne pouvait pas douter qu'il n'y eût, de la part des aimans, une réaction capable de diriger les courans et de les mouvoir de diverses manières. Entre tous ces phénomènes inverses des précédens, ceux qui devaient résulter de l'action magnétique de la terre se présentaient comme les plus curieux à examiner, et l'on essaya en effet de disposer des courans mobiles pour étudier les modifications qu'ils éprouveraient en les abandonnant comme des boussoles à l'influence du magnétisme terrestre. Ces premiers essais ne donnaient point de résultats satisfaisans, parce qu'il était difficile alors de donner au courant toute la mobilité désirable. Enfin, M. Ampère parvint à lever toutes ces difficultés par un mode ingénieux de suspension qui s'applique avec avantage à tous les courans mobiles. Il importe, avant d'aller plus loin, de donner une idée de cet ajustement.

La *figure* 177 représente deux colonnes verticales en cuivre, v et v′, fixées sur un pied en bois ll′; à leur extrémité supérieure, elles se recourbent *en potence* et viennent se terminer par les deux coupes c, c', dont les centres sont dans la même verticale; les parties de ces colonnes, qui semblent se toucher, sont séparées l'une de l'autre par des substances isolantes : ainsi, quand leur pied communique aux deux pôles de la pile par un moyen que nous allons

indiquer, il est évident que les fluides électriques arrivent, l'un dans la coupe c, l'autre dans la coupe c', et qu'il n'y a point de courant produit, à moins que l'on n'établisse une communication entre ces deux coupes, que l'on peut appeler l'une la *coupe positive*, et l'autre la *coupe négative*, suivant la nature du fluide qu'elles reçoivent.

Rien ne paraît plus simple que de faire arriver l'électricité au pied des colonnes; cependant, comme il est nécessaire de changer souvent les communications, de pouvoir instantanément les supprimer ou les établir dans un ordre inverse, sans rien déranger à l'appareil, M. Ampère a imaginé une disposition ingénieuse, qui remplit cet objet d'une manière très-commode.

n et n' (*Fig.* 160) sont deux rainures de quelques lignes de profondeur, creusées dans l'épaisseur d'une plaque en bois (*Fig.* 160 *bis*) qui peut se poser sur les tables des divers appareils électro-magnétiques; ν et ν', t et t' sont quatre cavités, creusées de la même manière et communiquant diagonalement par deux lames de cuivre, savoir par ll', qui va de ν en ν', et par mm', qui va de t en t'; au point de croisement, ces lames sont séparées par une petite bande de substance non conductrice, afin que le courant ne puisse jamais passer de l'une à l'autre. Les deux rainures et les quatre cavités sont remplies de mercure; mais préalablement elles ont été mastiquées avec de la résine, afin que le courant ne puisse pas s'établir au travers du bois, plus ou moins poreux et plus ou moins humide, qui les sépare.

Cela posé, concevons que l'on plonge le fil positif de la pile dans la rainure n et le fil négatif dans la rainure n'; il est évident que les fluides ne pourront passer ni dans l'une ni dans l'autre des quatres cavités ν, ν', t, t'; mais si l'on établit en même temps une communication de n à ν, et une autre de n' à t, le fluide passera de ν à ν' par la lame ll'; et de t à t' par la lame mm'; ainsi, la bande

b', qui communique à v', sera positive, et la bande b, qui communique à t, sera négative. Au contraire, si, en reprenant les choses au premier état, on établit des communications de R à t' et de R à v', la bande b' sera négative, et la bande b positive : or, ces deux bandes étant destinées à produire le courant, lorsqu'on les fait communiquer ensemble par un circuit métallique quelconque, il est clair que le courant traversera le circuit dans un sens ou dans l'autre, suivant que l'on mettra deux arcs conducteurs de R à v et de R' à t, ou qu'on les mettra de R à t' et de R' à v'. Si maintenant on jette les yeux sur la pièce à *bascule* BB' (*Fig.* 160 *bis*), on verra bientôt tout le mécanisme dont il nous reste à parler. Cette pièce est en bois et peut tourner autour de l'axe aa' qui s'ajuste dans les trous oo' sur les pieds P et P'; elle porte quatre arcs conducteurs en métal, deux d'un côté en c et c', et deux autres pareils de l'autre côté en d et d'. Quand elle est en place, les extrémités de l'arc c répondent à la rainure R et à la cavité v, celles de d' à la rainure R' et à la cavité t', celles de c' à R' et à t, celles de d à R' et à v'; leur longueur est telle que, dans cette position, ils ne touchent point au mercure; mais quand on fait tourner la bascule pour plonger les arcs c et c', le courant passe de b' à b, et quand on la fait tourner pour plonger les arcs d et d', le courant passe en sens inverse de b à b'.

Cet ajustement pris dans son ensemble s'appelle une *bascule;* il est établi au pied des deux colonnes v et v' de la *figure* 177; seulement, nous avons supprimé la pièce mobile, qui aurait empêché de voir les positions relatives des rainures et des cavités; on voit que les bandes b et b' de la *figure* 160 viennent aboutir chacune au pied de l'une des colonnes, et que c'est par elles que le fluide passe pour arriver aux coupes c et c'; en faisant plonger la bascule dans un sens ou dans l'autre, on rend chacune des coupes alternativement positive et négative.

Revenons maintenant à la *figure* 149, qui présente un fil de cuivre courbé en cercle et destiné à devenir un courant circulaire mobile; les extrémités de ce fil sont liées entre elles, mais séparées l'une de l'autre par une substance isolante; elles sont recourbées en crosse de telle manière qu'elles correspondent aux deux coupes *c* et *c'* de la *figure* 177; enfin, elles portent deux pointes d'acier, l'une qui doit poser sur la lame de verre un peu creusée, qui forme le fond des coupes; l'autre, qui doit simplement plonger dans l'autre coupe. L'eau acidulée, ou plutôt le mercure dont on remplit les deux coupes, achève d'établir les communications, et l'on observe ainsi un courant circulaire doué d'une grande mobilité.

Cette disposition s'applique évidemment à une portion de courant de forme quelconque, que l'on veut rendre mobile autour d'un axe vertical, pourvu que l'on ait soin de compléter l'équilibre avec des contre-poids, quand cette portion de courant n'est pas symétrique de part et d'autre de l'axe de rotation.

Le cercle de la *figure* 149 étant mis en place dans l'appareil de la *figure* 177, on fait passer le courant, et l'on voit à l'instant qu'il y a une force qui le sollicite; il se tourne, il oscille, et enfin il se fixe dans une position déterminée, à laquelle il revient sans cesse lorsqu'on l'en écarte. Ensuite, lorsqu'en plongeant la bascule en sens contraire on change la direction du courant, le cercle fait une demi-révolution, vient osciller de l'autre côté et se fixer enfin dans une position diamétralement opposée. Dans les deux cas le plan d'équilibre où il s'arrête se trouve exactement perpendiculaire au plan du méridien magnétique.

Ce phénomène et les autres actions que la terre exerce sur les courans furent expliqués pour la première fois dans le mémoire que je présentai à l'Institut sur ce sujet (*Annales de Chimie*, tome XXI, page 77). M. Auguste de La Rive

avait fait de son côté des recherches analogues, dont il donna connaissance très-peu de temps après *à la Société d'Histoire naturelle de Genève* (*Bibliothèque universelle*, tome XXI, page 21, et *Annales de Chimie*, tome XXI, page 24). Concevons d'abord le plan du cercle dans le méridien magnétique; soit cM (*figure* 149) la direction de la force terrestre, tm, $t'm'$ les deux tangentes parallèles à cM. L'effet magnétique de la terre doit être le même que celui d'un aimant, dont le pôle boréal serait placé très-loin sur le prolongement cM; ainsi, entre ce pôle et l'arc tdt' du circuit, il y a deux forces formant un couple, dont l'une tend à pousser le pôle boréal à droite, et l'autre l'arc du courant à gauche; en vertu de celle-ci l'arc tdt' tend à passer derrière, et à venir s'arrêter dans un plan perpendiculaire au plan de la figure; l'arc $t'd't$ au contraire tend, par la même raison, à passer en avant du plan de la figure, et à venir s'arrêter dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique. Ces deux forces agiraient dans le même sens pour faire tourner le cercle autour du diamètre tt', et comme il ne peut tourner qu'autour du diamètre dd', on voit que la force directrice est seulement égale à la différence des arcs dt' et dt, plus à la même différence des arcs td' et $d't'$. C'est là ce qui détermine en même temps la rotation et le sens dans lequel elle doit s'accomplir.

En renversant le courant, il est clair que la rotation doit se faire en sens contraire, et que la position d'équilibre doit être, comme on l'observe, diamétralement opposée.

Si l'appareil était placé directement sur le pôle boréal magnétique de la terre, la force directrice serait nulle, puisque les deux tangentes étant alors verticales, l'arc td serait égal à l'arc dt', et l'arc td' à l'arc $d't'$.

Au contraire, sur l'équateur magnétique, la force directrice est la plus grande possible, puisque, les tangentes étant

alors horizontales, chacune des demi-conférences tend à tourner en sens contraire.

Des circuits fermés, triangulaires, carrés, ou d'une autre figure quelconque, peuvent être mis en expérience sur le même appareil (*Fig.* 177), et c'est aussi par les mêmes principes que l'on détermine le sens et l'intensité de leur force directrice. Pour que l'action de la terre se neutralise par elle-même dans un lieu quelconque, il suffit d'ajuster les fils pour avoir, de part et d'autre de l'axe de rotation, des parties symétriques que le courant traverse dans le *même sens*; par exemple, la *figure* 148 représente un rectangle qui n'a aucune force directrice; en effet, il est facile de voir, en suivant la direction du courant sur la figure, qu'il y a toujours de part et d'autre de l'axe, des forces égales qui se détruisent mutuellement, puisqu'elles tendent à produire une rotation dans le même sens.

On peut étudier toutes les propriétés des courans rectilignes verticaux, au moyen de l'appareil qui est représenté dans la *figure* 143 : il se compose de deux vases cylindriques en cuivre; l'un supérieur, et l'autre inférieur d'un diamètre un peu plus grand. Ces vases sont percés en leur milieu d'une ouverture un peu large, pareillement cylindrique, dans laquelle passe la tige *t*, qui se termine par la coupe *c*. La traverse *hh'* est de substance non conductrice; elle porte en son milieu une pointe par laquelle elle repose en équilibre sur le fond de la coupe *c*, remplie de mercure. Les fils *v* et *v'* attachés à la traverse, sont recourbés, pour plonger par une extrémité dans l'eau acidulée du vase supérieur, et par l'autre dans l'eau acidulée du vase inférieur. Une petite languette en métal, soudée sur le fond du premier, vient plonger dans le mercure de la coupe, pour établir une communication entre l'eau et la tige. Ainsi le courant qui entre par le vase inférieur passe dans l'eau acidulée, dans les fils verticaux, dans l'eau acidulée du vase supérieur, dans la languette, dans la coupe, et vient enfin descendre par la tige *t*.

Lorsqu'on relève l'extrémité inférieure ou supérieure de l'un des fils, pour le faire sortir de l'eau acidulée, de manière que le courant passe seulement par l'autre fil, le système se dirige et vient se placer dans le plan perpendiculaire au méridien magnétique : si le courant est ascendant, le fil qu'il traverse se place à l'occident, ou du moins s'il vient à l'orient, il n'y trouve qu'une position d'équilibre instable, dont la moindre force peut le déranger; c'est le contraire quand le courant est descendant.

On voit par cette raison que les deux fils pris ensemble, s'ils sont bien égaux, diamétralement opposés, placés à la même distance de l'axe, et traversés par des courans de même intensité, doivent former un système complètement indifférent à l'action de la terre, puisque, dans toutes les positions autour de l'axe, les deux fils sont alors sollicités par des forces parallèles, égales et dirigées dans le même sens, qui ne cessent pas de se faire équilibre. Mais il n'en est plus de même lorsque les deux fils ne sont pas diamétralement opposés, ou lorsqu'il existe entre eux quelque légère différence de diamètre, de forme, de longueur, de distance à l'axe, ou de faculté conductrice qui entraîne quelque inégalité dans les momens de rotation. On peut, en variant ces diverses circonstances, faire un grand nombre d'expériences intéressantes.

Des circuits de différentes formes, mobiles autour d'un axe plus ou moins oblique ou plus ou moins incliné à l'horizon, peuvent prendre aussi des positions d'équilibre stables ou instables, qui sont dans des rapports déterminés avec la direction de la force magnétique de la terre. La *figure* 150 représente, par exemple, un courant qui se dirige perpendiculairemant à l'aiguille d'inclinaison, quand l'axe horizontal, autour duquel il tourne, se trouve lui-même perpendiculaire au plan du méridien magnétique. En effet, les diverses portions latérales qui se trouvent alors dans le plan du méridien, n'éprouvent aucune action qui

puisse les faire tourner ou les diriger; mais les portions horizontales h et h', situées, la première du côté du midi, et la seconde du côté du nord, reçoivent dans nos climats toute l'action du pôle boréal de la terre; il en résulte deux forces perpendiculaires à l'aiguille d'inclinaison, qui concourent à faire tourner l'appareil dans le même sens : celle qui agit sur la portion h' tend à la déprimer au dessous de l'horizon, et celle qui agit sur la portion h tend au contraire à l'élever au dessus; et ces forces égales ne se détruisent autour de l'axe aa' que quand elles sont parvenues à agir dans des directions opposées, c'est-à-dire, dans la perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison, qui pourrait se mouvoir autour du même axe aa'.

Pour construire cet appareil et pour le mettre en expérience, on plie un fil de cuivre à partir de l'extrémité a, en suivant exactement toutes les directions qui sont marquées par des flèches sur la figure; on met une petite bande de cuir ou de bois sec aux deux points de croisemens, et on le pose en équilibre par les deux extrémités a et a' à peu près comme l'aimant de la *figure* 157, afin que le courant puisse entrer et sortir sans gêner le mouvement de rotation.

416. *Direction des courans par les aimans.* — Ce que nous venons de dire sur la direction que le magnétisme de la terre imprime aux courans mobiles, suffit pour indiquer la plupart des effets qui seront produits par l'action des aimans; mais comme la terre agit sans cesse, il faudra, pour ne pas compliquer les expériences, employer des appareils dans lesquels son influence se détruise d'elle-même. Par exemple, le double rectangle de la *figure* 148 étant suspendu dans l'appareil de la *figure* 177, on verra qu'il reste en équilibre dans toutes les positions, et en approchant l'un des pôles d'un aimant, il sera facile de l'attirer, de le repousser et de lui imprimer des mouvemens dans tous les sens. Lorsqu'on fait ces expériences, on est frappé

d'abord des alternatives d'attraction et de répulsion qui se manifestent pour des positions de l'aimant très-peu différentes; en portant l'un de ses pôles un peu plus à droite ou un peu plus à gauche, en l'approchant ou en l'éloignant d'une quantité très-petite, on observe à l'instant un renversement dans l'action. Tous ces mouvemens si divers et si compliqués en apparence, se déduisent du principe général que nous avons énoncé (411). Pour les expliquer, il suffit d'analyser les couples différens qui résultent de l'action de chaque pôle sur les diverses parties du courant, et d'observer en même temps la disposition de ses forces par rapport à l'axe de rotation, et les bras de leviers par lesquels elles agissent; c'est un problème qui n'est, pour ainsi dire, que l'inverse du problème général dont nous avons alors indiqué la solution.

On doit à M. de La Rive plusieurs expériences ingénieuses, par lesquelles il fait voir que des courans très-faibles peuvent être dirigés par les aimans, ou même par l'action magnétique de la terre. Ces petits appareils sont des courans flottans, dont on peut varier la forme à volonté; nous en avons représenté deux dans les *figures* 155 et 156. Dans un morceau de liége, destiné à flotter sur un large vase d'eau acidulée, on fait passer une petite feuille de zinc z, qui est soudée en s à un ruban ou à un fil de cuivre c; après avoir décrit une circonférence dans la figure 155, et diverses circonvolutions dans la *figure* 156, ce fil de cuivre vient à son tour passer dans le liége, et plonger dans l'eau acidulée à une petite distance de la feuille de cuivre. Dès que l'appareil est sur l'eau, le courant s'établit dans la direction des flèches, et il est assez sensible pour être dirigé par la terre, et à plus forte raison pour être attiré ou repoussé par les aimans. Par exemple, lorsqu'on présente le pôle boréal d'un aimant au cercle de la *figure* 155, à une certaine distance, on le voit se tourner sur lui-même d'une certaine manière, puis s'avancer vers le pôle, s'engager

dans l'aimant, arriver jusqu'au milieu, et là s'arrêter après diverses oscillations. Si on avance ou si on recule l'aimant, le cercle avance ou recule pour garder sa position, qui est en effet la seule, comme on peut le voir aisément, dans laquelle il se trouve en équilibre stable.

417. *Rotation des courans par l'action de la terre.* — L'appareil qui sert à démontrer la rotation des courans par l'action de la terre est représenté dans la *figure* 145; c'est l'appareil de la *figure* 143, dans lequel on a enlevé le vase supérieur; il reste le vase inférieur F, F', dans lequel on met de l'eau acidulée, et la tige t avec sa coupe c sur laquelle on pose le rectangle de la *figure* 147. Le ruban de cuivre circulaire $r\,r'$ qui unit les extrémités inférieures des fils verticaux $v\,h$ et $v\,h'$ sert seulement à les maintenir et à rendre les communications plus complètes.

Le rectangle étant posé en équilibre dans la coupe et les communications établies, on fait passer le courant, soit pour qu'il monte par les deux fils $v\,h$ et $v'\,h'$ et descende par la tige t, soit pour qu'il monte par la tige et descende par les fils; alors la partie mobile $v\,v'\,h\,h'$ se met en mouvement et accomplit des révolutions successives dont la rapidité dépend de la force de la pile et de la conductibilité des liquides que contiennent les vases. Aussitôt qu'on change la direction du courant, le mouvement se ralentit, s'arrête, et recommence, en sens inverse, avec la même rapidité. C'est M. Ampère qui a fait le premier cette expérience curieuse du mouvement continu de rotation. Nous avons déjà montré que deux branches verticales, diamétralement opposées, comme v et v', et traversées l'une et l'autre par des courans ascendans ou descendans, restent complètement indifférentes sous l'influence du magnétisme de la terre; ainsi le phénomène de rotation ne peut pas être produit, comme on l'avait supposé d'abord, par les forces qui s'exercent sur ces parties mobiles de l'appareil; les deux branches horizontales $m\,h$, $m\,h'$ sont les seules qui

déterminent la rotation. Par exemple, quand le courant est ascendant dans les branches verticales, il va de h en m et de h' en m; or, si nous supposons que $h\,h'$ soit dans le méridien magnétique, h au midi et h' au nord, l'effet du pôle boréal de la terre sur $m\,h'$ donne naissance à une force qui tend à faire passer $m\,h'$ en avant du plan de la figure; et son effet sur $m\,h$ donne naissance à une force égale qui tend à faire passer $m\,h$ derrière le même plan; ce sont ces deux forces qui déterminent le mouvement continu, et la direction dans laquelle il doit s'accomplir, car il est facile de voir que $h\,h'$, arrivé dans la position perpendiculaire au plan du méridien magnétique, est encore sollicité dans le même sens, quoique avec une intensité un peu moindre.

C'est d'ailleurs ce qu'on peut vérifier directement au moyen du petit appareil qui est représenté dans la *figure* 151, comme je l'ai fait voir dans le Mémoire cité plus haut. Cet appareil ressemble au précédent; seulement la tige t est très-courte et les branches verticales sont supprimées; il ne reste que les branches horizontales $m\,h$ et $m\,h'$, et de petits appendices verticaux qui plongent dans l'eau acidulée. Les petites boules b et b' servent à équilibrer et à donner de la stabilité à l'équilibre. Dès que les communications sont établies, la rotation s'accomplit avec une grande vitesse. Il est évident qu'une seule des branches $m\,h$ ou $m\,h'$ tournerait pareillement, et c'est ce que l'on peut encore vérifier, en supprimant sur l'une d'elles la petite portion verticale qui plonge dans l'eau.

La vitesse de rotation augmente avec l'inclinaison : au pôle magnétique, elle serait la plus grande possible, tandis qu'à l'équateur magnétique, elle serait exactement nulle.

La *figure* 178 représente un autre appareil de M. Ampère, avec lequel on peut varier de diverses manières ces expériences de rotation.

AA' et BB' sont deux vases en cuivre, de forme annulaire, séparés l'un de l'autre et incrustés sur un disque en bois; on les remplit de mercure ou d'eau acidulée.

m est la coupe moyenne; elle est soudée à une lame qui va se replier verticalement et porter la coupe centrale *c*.

d est la coupe de droite; elle communique au vase AA'.

g est la coupe de gauche; elle communique au vase BB'.

aa', petit ruban de cuivre formant un arc de cercle d'environ 90°, et de même rayon que le vase AA' dans lequel il doit plonger.

bb', petit arc de cercle pareil au précédent qui doit plonger dans le vase BB'.

Ces deux arcs sont joints par deux fils de cuivre en *sautoir*, qui se croisent et qui se touchent sur la pièce qui porte le pivot *p*; mais, aux extrémités *a'* et *b'*, ces fils sont isolés et ne communiquent point aux arcs de cuivre.

Lorsque le pivot du sautoir repose sur la coupe centrale *c*, que l'arc *aa'* touche légèrement au mercure de AA', et l'arc *bb'* au mercure de BB', ou que ces arcs plongent dans l'eau acidulée, on fait passer le courant par la coupe de droite *d*, par exemple, et par la coupe moyenne *m*; alors le courant va seulement de *a* en *p* et le sautoir tourne dans un sens ou dans l'autre, suivant la direction du courant.

Au contraire, si l'on fait passer le courant par la coupe de droite *d* et par la coupe de gauche *g*, le sautoir reste immobile, parce que les deux branches *a p* et *p b* tendent toujours à tourner en sens contraire, quel que soit l'angle qu'elles fassent entre elles.

418. *Rotation des courans par les aimans.* — Avec le pôle d'un aimant convenablement disposé relativement au courant horizontal de la *figure* 151, on peut produire à volonté tous les phénomènes que produirait l'action magnétique de la terre dans tous les climats, depuis l'équateur jusqu'aux pôles.

1°. Le pôle boréal d'un barreau étant présenté *au dessous* de l'appareil et agissant ainsi dans le même sens que le magnétisme terrestre, on observe une grande accélération de vitesse dans la rotation.

2°. Le même pôle étant au contraire présenté *au dessus* de l'appareil, son action est inverse de celle de la terre, et l'on peut, en variant les distances, faire tour à tour prédominer la force de l'aimant ou celle du globe terrestre.

3°. Le pôle austral de l'aimant agit toujours en sens contraire du pôle boréal; et comme l'action de chacun des pôles détermine des rotations opposées, en passant au dessus ou au dessous du plan horizontal hh', il est évident que dans ce plan lui-même, l'action de chacun est exactement nulle. On peut ainsi faire avec cet appareil un grand nombre d'expériences, dont il sera facile d'expliquer toutes les particularités.

Les expériences que l'on peut faire avec les courans verticaux, ascendans ou descendans, de la *figure* 143, ne sont ni moins nombreuses, ni moins variées, ni moins faciles à expliquer. Par exemple, il est évident que les deux courans diamétralement opposés, qui forment un système indifférent sous l'influence du magnétisme terrestre, forment au contraire un système capable de recevoir un mouvement de rotation très-rapide sous l'action de l'un des pôles d'un aimant. Concevons en effet le cylindre indéfini que décrivent en tournant les deux fils verticaux v, v', et leurs prolongemens; lorsqu'un pôle austral sera placé quelque part dans l'intérieur de ce cylindre, soit au dessus, soit au dessous des courans, il produira partout une rotation continue dans un sens ou dans l'autre, suivant que le courant sera ascendant ou descendant. Un pôle boréal placé seul produira aussi le même phénomène, toujours en sens inverse, de telle sorte qu'on n'aurait plus de rotation si ces deux pôles contraires agissaient en même temps dans des positions où leur énergie fût égale.

Placés au dehors du cylindre indéfini dont nous venons de parler, les pôles d'un aimant ne peuvent plus produire de rotation; mais ils impriment simplement une direction déterminée au système mobile.

Les appareils des *figures* 145 et 147 participent à la fois aux propriétés des branches horizontales et à celles des branches verticales, et ils éprouveront, de la part des aimans, des effets composés dont il sera facile de faire l'analyse.

On doit à M. Faraday un appareil très-simple, au moyen duquel on produit aisément le phénomène de la rotation continue; il est représenté dans la *figure* 146. zz' est un vase en zinc, percé en son milieu, et portant une petite traverse sur laquelle est soudée en s une tige de cuivre sc.

Dans la coupe qui termine cette tige, on met en équilibre l'appareil de la *figure* 147; le mercure de la coupe et l'eau acidulée du vase, dans laquelle plonge le ruban circulaire, complètent les communications, et le courant mobile se met à tourner rapidement sous l'influence des barreaux qui sont placés en A au dessous du vase. On peut même donner à cet appareil assez de sensibilité pour qu'il tourne sous l'influence de la terre.

Enfin, l'on doit à sir H. Davy trois expériences très-remarquables sur les phénomènes que présentent les courans qui passent dans le mercure ou dans le vide.

Premièrement. On met au fond d'une soucoupe ou d'un large vase en verre une masse de mercure assez considérable, sur laquelle on verse une couche d'eau acidulée; les deux pôles d'une pile viennent plonger verticalement dans le mercure en deux points qui soient à peu près à égale distance du centre et de la circonférence; le courant une fois établi de cette manière, on n'observe aucun phénomène particulier; mais dès qu'on approche l'un des pôles d'un puisssant aimant, le mercure semble d'abord agité et tournoyant, et bientôt après toute la masse se met en mou-

vement de rotation très-rapide, autour de chaque fil, comme autour d'un axe; la direction de ces mouvemens est déterminée par celle du courant, par la position et par la nature du pôle magnétique qu'on lui présente. L'action est plus vive lorsqu'on fait agir deux pôles contraires d'un aimant, l'un au dessus, l'autre au dessous du mercure, et hors de l'espace qui est compris entre les fils.

Secondement. On fait passer, par le fond d'un large vase en verre, deux gros fils de cuivre enduits de cire, excepté à leur extrémité supérieure, et s'élevant perpendiculairement jusqu'à un pouce environ au dessus du fond. Ces deux fils sont à trois pouces l'un de l'autre. Le vase étant rempli de mercure, de manière que le niveau s'élève à une ou deux lignes au dessus des fils, on fait passer un courant très-énergique. Alors on observe les phénomènes suivans : le mercure est fortement agité, sa surface au dessus de chaque fil s'élève en forme de petits cônes d'où s'échappent de petites ondes dans toutes les directions; le seul point sans agitation paraît être celui de la rencontre de ces ondes, au centre du mercure, entre les deux fils. Ensuite, lorsqu'on approche graduellement au dessus de ces cônes le pôle d'un barreau fortement aimanté, son sommet s'affaisse peu à peu, et enfin il retombe au niveau; et même, à une moindre distance, le barreau détermine une dépression du mercure et une espèce d'entonnoir mobile et tourbillonnant, dont le sommet descend presque jusqu'à l'extrémité du fil.

L'étain en fusion présente le même phénomène.

Troisièmement. Le courant qui passe dans le vide, et dont nous avons parlé précédemment (401), peut être agité, dirigé et mis en mouvement par le pôle d'un aimant puissant. L'étincelle qui part des conducteurs de la machine semble avoir trop de vitesse et d'impétuosité pour obéir à l'action des aimans; ainsi, nous ne devons pas être étonnés que les éclairs qui sillonnent le ciel pendant les orages ne soient pas sensiblement dirigés par l'action magnétique de

la terre; tandis que l'électricité plus diffuse qui se manifeste dans les hautes régions de l'atmosphère par une lumière moins éclatante et moins instantanée obéit à cette influence, et semble en recevoir, non pas son mouvement, mais sa direction et son arrangement. Nous verrons dans la Météorologie que cette expérience curieuse de sir H. Davy est une donnée fondamentale pour expliquer les causes et les apparences des aurores boréales. Mais il reste encore des recherches importantes à faire sur les phénomènes singuliers que présentent les courans lorsqu'ils traversent les fluides élastiques raréfiés ou les liquides conducteurs.

CHAPITRE III.

De l'action des Courans sur les Courans.

419. *Découverte de l'attraction et de la répulsion des courans parallèles.* — Après la découverte de M. OErsted, M. Ampère fut conduit par des vues théoriques particulières à essayer l'action des courans sur les courans, et il parvint bientôt à une série de phénomènes qui offrent un grand intérêt par leurs variétés, et un intérêt plus grand encore par les liaisons qu'ils établissent entre les fluides électriques et magnétiques.

L'appareil qui nous servira à exposer les recherches de M. Ampère est représenté dans la *figure* 181.

LL′, tablette en bois.

VV′, deux colonnes verticales en cuivre, recourbées perpendiculairement et venant se joindre par un petit cylindre d'ivoire, qui est assez mauvais conducteur pour que le courant ne passe jamais directement d'une colonne à l'autre.

m m′, deux coupes *moyennes*, c'est-à-dire se trouvant dans la verticale du milieu de l'appareil.

d d′, deux coupes situées à *droite*.

g g′, deux coupes pareilles situées à *gauche*.

m′ i′, petit cylindre en métal portant la coupe *m′* et se divisant en *i′*, en deux branches qui vont donner naissance, l'une à la coupe supérieure de droite *d*, l'autre à la coupe inférieure de gauche *g′*.

m i, cylindre creux portant la coupe *m*; il semble enve-

lopper la tige $m'i'$; mais il en est séparé, au moyen d'un tube de verre, et il se divise pareillement en deux branches : l'une qui va donner naissance à la coupe *inférieure* de droite d', et l'autre à la coupe *supérieure* de gauche g.

l, languette ou lame de cuivre flexible communiquant à la colonne V, et pouvant plonger à volonté dans le mercure de la coupe m'.

l' languette pareille communiquant à la colonne V' et pouvant plonger à volonté dans le mercure de la coupe m.

Ainsi, le fluide qui se meut sur la colonne V' vient aboutir aux coupes g et d', et celui qui se meut sur la colonne V vient aboutir aux coupes d et g'.

B' bascule au moyen de laquelle on fait entrer le courant alternativement par la lame en cuivre M ou par la colonne V.

B bascule pareille, au moyen de laquelle on fait arriver le courant dans la bande b ou dans la bande b'.

o et o', deux ouvertures, ou petites cavités pleines de mercure, dans lesquelles viennent aboutir les bandes b et b'. Elles sont destinées à recevoir diverses pièces que le courant doit traverser; s'il entre dans ces pièces par o il en sort par o', et *vice versâ*. Dans l'un et l'autre cas, il peut passer de là en M' ou en M, suivant que la bascule plonge dans un sens ou dans l'autre.

Après cette rapide description on pourra comprendre facilement les expériences par lesquelles nous allons démontrer, 1° que les courans parallèles qui vont dans le même sens s'attirent, et 2° que les courans parallèles qui vont en sens contraire se repoussent.

1°. Dans les coupes g et g' on suspend en équilibre le rectangle de la *figure* 148, sur lequel la terre ne peut exercer aucune action; et dans les ouvertures $o\,o'$ on pose le rectangle de la *figure* 176. Les dimensions de ces rectangles sont tellement combinées que les côtés latéraux du premier ne puissent pas, dans leur révolution, passer au delà de la verticale des coupes $m\,m'$; et que le côté latéral du

second, le seul qui doive agir, se trouve à peu près dans cette verticale.

Les choses étant ainsi disposées, on fait passer le courant en le faisant, par exemple, monter par la colonne v; il arrive successivement en l, en m', dans la coupe g', passe dans le rectangle suspendu où il se trouve ascendant, suivant les deux côtés latéraux extrêmes, et descendant par les deux côtés du milieu (ce mouvement est contraire au mouvement qui est désigné par les flèches de la *figure* 148), et revient ainsi dans la coupe g; de là il passe en m et en l' pour aller descendre par la colonne v' et arriver par M' à la bascule B; cette bascule penche en *avant*, le courant entre par la bande b, passe dans la cavité o, prend le côté vertical du rectangle fixe (*Fig.* 176), monte, traverse, descend et revient par le côté horizontal inférieur z' qui plonge dans la cavité o'; de là il passe en b', en M, et à la bascule B', dans laquelle il achève son circuit. Alors la branche verticale z du rectangle fixe, et les branches latérales du rectangle mobile, traversées par des courans parallèles et ascendans, exercent l'une sur l'autre une *attraction* plus ou moins forte; quelle que soit la position que l'on donne d'abord au rectangle mobile, on le voit tourner sur lui-même pour amener l'une ou l'autre de ses branches aussi près qu'il est possible de la branche z. *Ainsi deux courans parallèles qui vont dans le même sens s'attirent;* on peut même, pour mieux encore s'assurer de cette vérité, rendre les courans descendans dans les branches qui agissent l'une sur l'autre, au lieu de les rendre ascendans comme nous venons de le dire. Pour cela il suffit de retourner la bascule B' en laissant la bascule B dans sa position. Alors le courant entre par M, et la bascule B étant en *avant*, comme tout à l'heure, il arrive par la bande b' dans la cavité o', entre par le côté horizontal z'', fait le tour du rectangle, revient en o, et passe dans la bande b''; de là il continue son chemin par M, monte par la colonne v', arrive en l', puis dans la coupe m,

pour passer en g, et par conséquent pour faire le tour du rectangle mobile en descendant par les branches latérales et revenir ensuite en g', en i' m', en l, en v et à la bascule B'. Ces deux courans parallèles descendans exercent l'un sur l'autre la même attraction que les deux courans parallèles ascendans.

Maintenant, pour faire passer les courans en sens contraire, c'est-à-dire pour rendre l'un d'eux ascendant et l'autre descendant, il suffit encore de tourner convenablement les bascules sans rien déranger à l'appareil. Veut-on, par exemple, que le courant soit descendant dans le rectangle mobile? et ascendant suivant la branche z du rectangle fixe, on laissera la bascule B' pour que le courant entre par M, et l'on tournera seulement la bascule B pour la faire cette fois plonger en *arrière*. Alors, de M le courant passe à la branche b, en o, et monte suivant la branche z pour traverser, redescendre et revenir en o', en b', passer en M' et continuer sa route comme tout à l'heure. Veut-on, au contraire, que le courant soit descendant suivant la branche z et ascendant suivant les côtés latéraux du rectangle mobile? il suffira de changer la bascule B', puisque le courant devra, de cette manière, monter par la colonne v, arriver dans la coupe g', revenir en g, et de là en m, en l', en v', en M', et par conséquent entrer par la bande b' dans le rectangle fixe pour traverser le côté horizontal et venir descendre par la branche z. On démontre de cette manière que *deux courans parallèles et marchant en sens contraire se repoussent*.

420. *De la force qui s'exerce entre les courans rectilignes non parallèles.* — Puisque les courans parallèles s'attirent ou se repoussent, il est présumable que les courans inclinés l'un et l'autre, soit dans le même plan, soit dans des plans différens, ne doivent pas être sans action mutuelle. En effet, M. Ampère a démontré qu'ils tendent sans cesse à prendre la position de parallélisme, et que, dans cette

position, leur équilibre est stable s'ils vont dans le même sens, et instable s'il vont en sens contraire. Pour en faire l'expérience on ajuste dans l'appareil de la *figure* 181 les deux rectangles qui sont représentés dans la *figure* 175; celui d'en haut, destiné à être mobile sur ses deux pointes, se place dans les coupes d, d', et celui d'en bas se pose sur la table LL', ses deux appendices z, z' plongeant dans les deux cavités o, o'; pour celui-ci, au lieu d'un seul contour rectangulaire, on peut en employer plusieurs isolés l'un de l'autre et faisant l'office de multiplicateur. On voit, par cette disposition, que le simple mouvement des bascules B et B' suffira pour établir les communications et pour faire passer le courant dans telle direction que l'on voudra, soit dans le côté inférieur du rectangle mobile, soit dans le côté supérieur du rectangle fixe; car ce sont les deux côtés qui doivent agir l'un sur l'autre. Or, après avoir donné primitivement au rectangle mobile une direction quelconque, on le voit, dès que le circuit est établi, tourner autour de son axe de suspension, venir se placer dans la position que représente la *figure* 175, et se diriger *toujours* de manière que dans ce parallélisme les courans marchent dans le même sens. Cette position seule donne de la stabilité à son équilibre, car il y revient par une série d'oscillations quand on l'en écarte; et lorsqu'on l'a placé d'abord dans une position diamétralement opposée, il y reste en équilibre instable, pour en sortir au moindre choc, et regagner enfin la direction de stabilité. Cette loi remarquable de l'action des courans non parallèles peut être encore exprimée d'une autre manière; bien qu'ils ne soient pas dans le même plan, on peut les regarder comme faisant entre eux un certain angle, et, considérant alors les diverses portions des courans à partir du sommet de cet angle, on peut dire : *Que deux portions de courans s'attirent quand elles vont l'une et l'autre en s'approchant ou en s'éloignant du sommet de l'angle, et qu'elles se re-*

poussent quand elles vont l'une en s'éloignant et l'autre en s'approchant de ce même sommet. Ainsi z'c' et cz (*Fig.* 175 *bis*) étant deux courans inclinés situés dans des plans différens et faisant entre eux un angle dont le sommet est en s, les portions c's et zs se repoussent, puisque la première s'éloigne et la seconde s'approche du sommet; il en est de même des portions sc et sz', tandis qu'au contraire les portions sc et sc' s'attirent comme s'éloignant l'une et l'autre du sommet, et les portions sz et sz' s'attirent comme s'en approchant l'une et l'autre. Par conséquent, si zc est mobile, on le verra tourner pour prendre la position dans laquelle c sera correspondant à c' et z à z'. Cet énoncé nous offrira de grands avantages pour expliquer les phénomènes de rotation que nous allons observer.

421. *De la rotation des courans par l'action des courans.* — Ces phénomènes sont produits au moyen des appareils qui sont représentés dans les *figures* 165 et 166. Dans le vase v du second l'on met un rectangle mobile semblable à celui de la *figure* 147, et dans le vase v du premier l'on met successivement les pièces mobiles représentées dans les *figures* 161, 162, 163 et 164. Mais avant de décrire les effets nous allons en indiquer la cause.

Concevons un courant rectiligne indéfini zc (*Fig.* 175 *ter*) allant de z en c, et un autre courant, ou seulement une portion de courant z'c' allant de z' en c' et pouvant se mouvoir parallèlement à elle-même; z'c' n'a aucun point de commun avec zc; mais ces deux lignes, sans se couper directement, font entre elles un angle dont nous pouvons supposer le sommet en s. Les portions sc et sc' s'attirent comme s'éloignant toutes deux du sommet de l'angle; les portions sc' et sz se repoussent, puisque la première s'éloigne du sommet, tandis que la seconde en approche; donc le courant z'c', attiré dans l'angle csc', et repoussé dans l'angle zsc', devra se mouvoir de s vers c et prendre un

mouvement progressif continu. Cette expérience serait assez difficile à tenter à cause de l'embarras que l'on éprouverait à suspendre z' c' pour lui permettre cette espèce de translation parallèle. Mais, au moyen d'une légère modification qui ne change rien au raisonnement, il devient facile de réaliser ce phénomène curieux. Au lieu du courant rectiligne z c prenons un courant circulaire, et même, pour lui donner plus d'énergie, prenons un courant circulaire plusieurs fois replié sur lui-même, formant un véritable multiplicateur. Un ruban de cuivre, couvert de soie, et tourné en hélice, remplit très-bien cet objet. Dans le cercle intérieur d'une telle hélice, concevons que l'on suspende l'appareil de la *figure* 147 et que l'on fasse passer le courant dans les contours de l'hélice et dans les branches de l'appareil suspendu; il est évident que nous aurons ainsi une rotation continue dont la vitesse sera proportionnée à la force de la pile et dont la direction sera dépendante de la direction du courant dans les branches verticales vv' et dans les replis de l'hélice. Dans la disposition que représenterait alors la figure, le mouvement devrait se faire en sens inverse de la direction du courant dans l'hélice; il continuerait de se faire ainsi sans rebrousser chemin si l'on changeait à la fois les directions du courant fixe et celle du courant mobile; et, au contraire, il s'arrêterait bientôt pour recommencer en sens inverse si l'on changeait les directions du courant fixe sans changer celle du courant mobile, ou *vice versâ*.

Le ruban de cuivre ou le simple fil roulé en hélice et faisant l'office de multiplicateur est ajusté autour du vase v, *figure* 166; x est l'une de ses extrémités et z l'autre, le bord du vase est replié sur l'hélice et l'enveloppe extérieurement pour la mettre à l'abri des gouttes de liquide qui pourraient tomber et qui établiraient alors une communication entre les divers plis de l'hélice.

Les pièces de l'appareil sont disposées pour que l'on

puisse, à volonté, changer la direction du courant dans l'hélice seulement, ou dans le courant.

Il est vrai que dans cette expérience l'action de la terre s'exerce sur le courant mobile pour lui imprimer un mouvement de rotation continu, analogue à celui que l'on observe; mais si l'hélice a un assez grand nombre de tours, sa force l'emporte sur celle de la terre, comme il est facile de le voir par le sens du mouvement; car, en changeant la direction du courant dans l'hélice seule, le courant mobile se meut alors successivement dans un sens et dans l'autre, et ses vitesses sont inégales, puisque l'une d'elles est combattue et l'autre favorisée par l'action de la terre.

M. Savary a observé un autre phénomène de rotation très-remarquable dont toutes les circonstances ne sont peut-être pas expliquées par le principe précédent. Concevons un ruban de cuivre mince plié en cercle (*Fig.* 161), de manière que ses deux extrémités A et A′ ne se joignent pas tout à-fait, l'espace qui reste entre elles étant rempli par une petite bande d'ivoire ou de quelque autre substance non conductrice; près de l'extrémité A est soudé un petit fil de cuivre AH qui se replie horizontalement, pour aller rejoindre un autre fil *non conducteur* attaché au cercle en un point diamétralement opposé. Cet appareil peut être mis en équilibre par la pointe *p* du fil horizontal dans la coupe *c* du vase V de la *figure* 165, le cercle ABA′ plongeant dans l'eau acidulée de ce vase. Alors, si l'on fait passer le courant, le cercle se met à tourner comme celui de la *figure* 150; la rotation n'est pas due à un courant extérieur puisqu'il n'y a pas d'hélice autour du vase V; elle n'est pas due non plus au magnétisme terrestre, car elle se fait toujours dans le même sens, soit que le courant monte, soit qu'il descende suivant AH, avec cette seule différence que la vitesse est un peu moindre quand elle est opposée à celle que produirait la terre. Il y a donc une autre cause différente de celles que nous avons observées jusqu'à pré-

sent; M. Savary la trouve dans les courans qui sortent du cercle mobile et qui traversent l'eau acidulée pour se rendre aux parois du vase. Par exemple, quand le courant descend par la branche HA, il doit parcourir le cercle ABA′ depuis A jusqu'en A′, et sortir par chacun de ses points; GS étant l'un de ses courans sortans, il y aura dans l'angle SGT une répulsion plus grande que dans l'angle SGT′, et par conséquent un mouvement de rotation dans le sens AGB, comme on l'observe en effet. De même, quand le courant viendra de l'eau acidulée pour entrer dans le cercle mobile et monter suivant AH, il y aura encore dans l'angle SGT une répulsion un peu plus grande que dans l'angle SGT′, puisque le courant de G en A est un peu plus fort que de B en G, et par conséquent mouvement de rotation dans le même sens, c'est-à-dire suivant AGB.

La rotation se fait en sens inverse avec l'appareil de la *figure* 162, parce que la branche verticale s'y trouve soudée à l'extrémité A′.

On observe les mêmes phénomènes avec les hélices planes *sinistrorsùm* et *dextrorsùm* représentées dans les *figures* 163 et 164.

Dans tous les cas, il y a des conditions à remplir relativement à la force de la pile et à la conductibilité du liquide qui environne le cercle mobile, afin que l'action répulsive des courans soit plus forte que l'action de la terre; car, dans certaines circonstances, c'est celle-ci qui l'emporte, et le mouvement change de sens quand on change la direction du courant.

422. *De l'équilibre des courans.* — Après avoir fait connaître, dans ce qui précède, les principaux phénomènes qui résultent de l'action mutuelle des courans sur les courans, nous devons essayer à présent de donner une idée des principes simples et peu nombreux sur lesquels M. Ampère a fondé une théorie mathématique de ces phénomènes qu'il appelle, en général, *phénomènes électro-*

dynamiques, parce qu'ils résultent de l'électricité en mouvement. Cette théorie est développée d'une manière complète dans le grand et beau travail qu'il a publié en 1826 (*Théorie des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience*), et nous ne pouvons mieux faire que d'en rapporter textuellement les passages suivans :

« Les divers cas d'équilibre que j'ai constatés, dit M. Ampère, par des expériences précises, donnent immédiatement autant de lois qui conduisent directement à l'expression mathématique de la force, que deux élémens de conducteurs voltaïques exercent l'un sur l'autre, d'abord en faisant connaître la forme de cette expression, ensuite en déterminant les nombres constans, mais d'abord inconnus, qu'elle renferme, précisément comme les lois de Képler démontrent d'abord que la force qui retient les planètes dans leurs orbites tend constamment au centre du soleil, puisqu'elle change pour une même planète en raison inverse du carré de sa distance à ce centre, enfin que le coefficient constant qui en représente l'intensité a la même valeur pour toutes les planètes. Ces cas d'équilibre sont au nombre de quatre :

» Le premier démontre l'égalité des valeurs absolues de l'attraction et de la répulsion qu'on produit en faisant passer alternativement en deux sens opposés le même courant dans un conducteur fixe dont on ne change ni la situation, ni la distance au corps sur lequel il agit.

» Le second consiste dans l'égalité des actions exercées sur un conducteur rectiligne mobile, par deux conducteurs fixes situés à égale distance du premier, et dont l'un est rectiligne, l'autre plié et contourné d'une manière quelconque, quelles que soient d'ailleurs les sinuosités que forme ce dernier.

» Le troisième consiste en ce qu'un circuit fermé de forme quelconque ne saurait mettre en mouvement une portion quelconque d'un fil conducteur formant un arc de

cercle dont le centre est dans un axe fixe, autour duquel il peut tourner librement et qui est perpendiculaire au plan du cercle dont cet arc fait partie.

» Le quatrième a pour but de prouver que trois courans circulaires étant dans le même plan, leurs centres o, o' o'' sur la même droite, leurs rayons formant une progression géométrique continue, le courant du milieu restera immobile quand les distances oo' et o' o'' seront entre elles dans le même rapport que les termes consécutifs de cette proportion. »

Le *premier cas* peut se démontrer au moyen du fil de la *figure* 172, dont on pose les deux extrémités z z' dans les cavités o, o' de l'appareil général de la *figure* 181. Ce fil, revêtu de soie et replié sur lui-même, est tel que le courant qui monte par une des branches descend par l'autre, les actions de ces courans opposés s'exerçant sensiblement à la même distance sur les courans ou sur les aimans qu'on en approche, ne produisent plus aucun phénomène, ni de direction, ni d'attraction.

Le *deuxième cas* peut se démontrer au moyen du fil de la *figure* 173, dont on pose pareillement les deux extrémités z, z' dans les deux cavités o, o' du grand appareil de la *figure* 181. Ce fil, revêtu de soie, est encore replié sur lui-même; mais l'une des branches est rectiligne, tandis que l'autre est sinueuse, et la compensation se fait encore très-exactement entre les actions contraires des courans opposés qui parcourent ces branches.

Le *troisième cas* se démontre au moyen de l'appareil représenté dans la *figure* 179. Voici l'expérience telle que la décrit M. Ampère dans l'ouvrage cité plus haut.

« Sur un pied en bois s'élèvent deux colonnes, EF, E′F′, liées entre elles par deux traverses LL′, FF′; un axe GH est maintenu entre ces deux traverses dans une position verticale. Ses deux extrémités G, H, terminées en pointes aiguës, entrent dans deux trous coniques pratiqués, l'un dans

la traverse inférieure LL′, l'autre à l'extrémité d'une vis KZ portée par la traverse supérieure FF′, et destinée à presser l'axe GH sans le forcer. En C est fixé invariablement à cet axe un support QO dont l'extrémité O présente une charnière dans laquelle est engagé par son milieu un arc de cercle AA′ formé d'un fil métallique qui reste constamment dans une position horizontale, et qui a pour rayon la distance du point O à l'axe GH. Cet arc est équilibré par un contre-poids Q, afin de diminuer le frottement de l'axe GH dans les trous coniques où ses extrémités sont reçues.

» Au dessous de l'arc AA*l* sont disposés deux augets M, M′ pleins de mercure, de telle sorte que la surface du mercure, s'élevant au dessus des bords, vienne toucher l'arc AA′ en B et B′. Ces deux augets communiquent par des conducteurs métalliques, MN, M′N′, avec des coupes P, P′ pleines de mercure. La coupe P et le conducteur MN qui la réunit à l'auget M sont fixés à un axe vertical qui s'enfonce dans la table de manière à pouvoir tourner librement. La coupe P′, à laquelle est attaché le conducteur M′N′, est traversée par le même axe, autour duquel elle peut tourner aussi indépendamment de l'autre. Elle en est isolée par un tube de verre V qui enveloppe cet axe, et par une rondelle de verre U qui la sépare du conducteur de l'auget M, de manière qu'on peut disposer les conducteurs MN, M′N′ sous l'angle qu'on veut.

» Deux autres conducteurs IR, I′R′ attachés à la table plongent respectivement dans les coupes P, P′, et les font communiquer avec des cavités R, R′ creusées dans la table et remplies de mercure. Enfin, une troisième cavité S pleine également de mercure se trouve entre les deux autres.

» Voici la manière de faire usage de cet appareil : on fait plonger l'un des rhéophores, par exemple, le réophore positif dans la cavité R, et le réophore négatif dans la cavité S, qu'on met en communication avec la cavité R′ par un con-

ducteur curviligne d'une forme quelconque. Le courant suit le conducteur RI, passe dans la coupe P, de là dans le conducteur NM, dans l'auget M, le conducteur M′ N′, la coupe P′, le conducteur I′ R′, et enfin de la cavité R′, dans le conducteur curviligne qui communique avec le mercure de la cavité s où plonge le réophore négatif.

» D'après cette disposition le circuit voltaïque total est formé :

» 1°. De l'arc BB′ et des conducteurs MN, M′ N′;

» 2°. D'un circuit qui se compose des parties RIP, P′I′R′ de l'appareil, du conducteur curviligne allant de R′ en s et de la pile elle-même.

» Ce dernier circuit doit agir comme un circuit fermé, puisqu'il n'est interrompu que par l'épaisseur du verre qui isole les deux coupes P, P′ : il suffira donc d'observer son action sur l'arc BB′ pour constater par l'expérience l'action d'un circuit fermé sur un arc dans les différentes positions qu'on peut donner à l'un et à l'autre.

» Lorsqu'au moyen de la charnière o on met l'arc AA′ dans une position telle que son centre soit hors de l'axe GH, cet arc prend un mouvement et glisse sur le mercure des augets M, M′ en vertu de l'action du courant curviligne fermé qui va de R′ en s. Si au contraire son centre est dans l'axe, il reste immobile; d'où il suit que les deux portions du circuit fermé qui tendent à le faire tourner en sens contraire autour de l'axe exercent sur cet arc des momens de rotation dont la valeur absolue est la même, et cela, quelle que soit la grandeur de la partie BB′ déterminée par l'ouverture de l'angle des conducteurs MN, M′ N′. Si donc on prend successivement deux arcs BB′ qui diffèrent peu l'un de l'autre; comme le moment de rotation est nul pour chacun d'eux, il sera nul pour leur petite différence, et par conséquent pour tout élément de circonférence dont le centre est dans l'axe; d'où il suit que la direction de l'action exercée par le circuit fermé sur l'élément passe

par l'axe, et qu'elle est nécessairement perpendiculaire à l'élément.

» Lorsque l'arc AA' est situé de manière que son centre soit dans l'axe, les portions de conducteur MN, M'N' exercent sur l'arc BB' des actions répulsives égales et opposées, en sorte qu'il ne peut en résulter aucun effet; et puisqu'il n'y a pas de mouvement, on est sûr qu'il n'y a pas de moment de rotation produit par le circuit fermé.

» Lorsque l'arc AA' se meut dans l'autre situation où nous l'avions d'abord supposé, les actions des conducteurs MN et M'N' ne sont plus égales : on pourrait croire que le mouvement n'est dû qu'à cette différence; mais suivant qu'on approche ou qu'on éloigne le circuit curviligne qui va de R' en S, le mouvement est augmenté ou diminué, ce qui ne permet pas de douter que le circuit fermé ne soit pour beaucoup dans l'effet observé.

» Ce résultat ayant lieu quelle que soit la longueur de l'arc AA', aura nécessairement lieu pour chacun des élémens dont cet arc est composé. Nous tirerons de là cette conséquence générale, que l'action d'un circuit fermé, ou d'un ensemble de circuits fermés quelconques, sur un élément infiniment petit d'un courant électrique, est perpendiculaire à cet élément. »

Le *quatrième cas* se démontre au moyen de l'appareil représenté dans la *figure* 180. Voici encore la description de l'expérience telle que la donne M. Ampère.

« Sur une tablette en bois est creusée une cavité A, remplie de mercure, d'où part un conducteur fixe ABCDEFG formé d'une lame de cuivre; la portion CDE est circulaire, et les parties CBA, EFG sont isolées l'une de l'autre par la soie qui les recouvre. En G ce conducteur et soudé à un tube de cuivre GH, surmonté d'une coupe I, qui communique avec le tube par le support HI du même métal. De la coupe I part un conducteur mobile IKLMNPQRS, dont

la portion MNP est circulaire; il est entouré de soie dans les parties MLK et PQR pour qu'elles soient isolées, et il est tenu horizontal au moyen d'un contrepoids *a* fixé sur une circonférence de cercle qu'un prolongement *bcg* de la lame dont est composé le conducteur mobile forme autour du tube GH. La coupe S est soutenue par une tige ST, ayant le même axe que GH, dont elle est isolée par une substance résineuse que l'on coule dans le tube. Le pied de la tige ST est soudé au conducteur fixe TUVXYZA′, qui sort du tube GH par une ouverture assez grande pour que la résine l'en isole aussi complètement dans cet endroit qu'elle le fait dans le reste du tube GH, à l'égard de ST. Ce conducteur, à sa sortie du tube, est revêtu de soie pour empêcher la portion TUV de communiquer avec YZA′. Quant à la portion VXY, elle est circulaire; et l'extrémité A′ plonge dans une seconde cavité A′ creusée dans la table et pleine de mercure.

» Les centres O, O′, O″ des trois portions circulaires sont en ligne droite; les rayons des cercles qu'elles forment sont en proportion géométrique continue, et l'on place d'abord le conducteur mobile de manière que les distances OO′, O′O″ soient dans le même rapport que les termes consécutifs de cette proportion; de sorte que les cercles O et O′ forment un système semblable à celui des cercles O′ et O″. On plonge alors le rhéophore positif en A et le réophore négatif en A′, le courant parcourt successivement les trois cercles dont les centres sont en O, O′, O″, qui se repoussent deux à deux, parce que le courant va en sens opposé dans les parties voisines. »

En s'appuyant sur ces données, M. Ampère est parvenu à une équation générale qui embrasse la théorie complète de l'action des courans sur les courans; seulement, pour déterminer le signe de l'une des constantes qui entrent dans cette équation, il a recours encore à un fait bien facile à constater par l'expérience directe; savoir, qu'un conduc-

teur rectiligne indéfini attire un circuit fermé, quand le courant électrique de ce circuit va dans le même sens que celui du conducteur dans la partie qui en est la plus voisine, et qu'il le repousse dans le cas contraire; fait très-simple qui se trouve encore confirmé par une conséquence immédiate à laquelle il conduit; savoir, que les parties rectilignes d'un même courant se repoussent. En effet, vv' (*Fig.* 174) étant un vase en terre rempli de mercure, mais séparé en deux compartimens par la cloison cc'; et $absb'a'$ étant un fil revêtu de soie, flottant sur le mercure et le touchant seulement par ses deux extrémités nues a et a'; si dans chaque compartiment on plonge l'un des pôles de la pile, le courant passe du mercure au fil, et celui-ci se trouve repoussé, ce qui est une preuve qu'il y a véritablement répulsion entre les parties du courant qui suivent les branches horizontales ab et $a'b'$, et les parties du courant qui sillonnent le mercure, soit pour affluer à l'une des extrémités, soit pour sortir par l'autre et regagner le pôle négatif de la pile.

Ainsi, M. Ampère a le double mérite d'avoir découvert tous les phénomènes essentiels qui résultent de l'action des courans sur les courans et d'avoir fondé une théorie mathématique au moyen de laquelle il résout habituellement toutes les difficultés qui se présentent, et tous les faits qui ont été observés jusqu'à présent sur les attractions et les répulsions des courans, sur leurs positions d'équilibre et sur les mouvemens de rotation qu'ils peuvent prendre sous des conditions données.

423. *Des solénoïdes et de leurs rapports avec les aimans.* — M. Ampère a essayé d'expliquer aussi, par les mêmes principes, tous les phénomènes qui résultent de l'action des aimans sur les courans et même ceux qui résultent de l'action des aimans sur les aimans et sur les substances magnétiques. Dans les applications de cette nature, il se présente toujours deux espèces de difficultés : celles

qui tiennent aux calculs et celles qui tiennent aux hypothèses physiques que l'on est obligé de faire. Pour le cas qui nous occupe, les calculs ont l'avantage d'être très-faciles : M. Ampère a donné à toutes ses formules beaucoup d'élégance et de simplicité; mais les diverses hypothèses sur lesquelles il faut s'appuyer pour construire les aimans avec des courans, sans être en contradiction manifeste avec les phénomènes connus, ne sont pas peut-être aussi conformes à la vérité qu'elles sont ingénieuses en apparence. Il faut supposer que chaque particule des corps magnétiques est environnée d'un courant électrique qui se meut sans cesse autour d'elle, dans un plan déterminé, mais variable; que dans les corps non aimantés, ces courans élémentaires ont toutes les directions possibles et ne peuvent par conséquent produire aucun phénomène extérieur, puisque les actions de ceux qui tournent dans un sens sont à chaque instant détruites par les actions contraires de ceux qui tournent en sens opposé; que l'aimantation fixe des barreaux trempés résulte d'une cause extérieure qui dirige dans un sens déterminé, et d'une manière permanente, les courans de toutes les molécules; que l'aimantation passagère produit le même effet, tant que la cause extérieure est agissante, et qu'aussitôt qu'elle cesse les courans moléculaires reprennent leurs directions diverses dont les effets se neutralisent au dehors; que ces courans, quoique infiniment nombreux et très-énergiques, ne produisent pas de chaleur sensible, puisqu'on n'observe pas une différence de température entre les corps magnétiques et les milieux qui les environnent, etc., etc.

Ces hypothèses, cependant, ne sont pas purement gratuites; car elles peuvent servir à déterminer et même à calculer les phénomènes dont nous avons parlé dans les deux chapitres précédens. De plus, si l'on essaie d'arranger directement des courans à peu près comme on conçoit qu'ils existent dans les aimans, on parvient à reproduire des phé-

nomènes d'attraction et de répulsion qui paraissent très-analogues aux phénomènes magnétiques. Un fil de métal revêtu de soie et roulé sur un cylindre en spires très-serrées forme ce que M. Ampère appelle un *solénoïde ;* et, bien que cet appareil ne soit qu'une imparfaite imitation des aimans, on observe que, quand il est traversé par un courant, il se dirige sous l'influence du magnétisme de la terre, il attire ou repousse un autre solénoïde pareil selon le pôle qu'on lui présente; enfin il est dirigé par les courans et sollicité par eux à peu près comme les aimans.

Ces expériences, et même ces analogies, sont certainement très-curieuses, et l'on peut espérer qu'elles conduiront à des phénomènes nouveaux qui serviront à établir d'une manière sûre et directe l'identité du magnétisme et de l'électricité, ou à découvrir quelque différence caractéristique entre ces deux grands agens de la nature.

CHAPITRE IV.

Des Phénomènes Thermo-électriques.

424. On appelle *phénomènes thermo-électriques* ceux qui résultent des courans électriques que l'on peut exciter dans les métaux par les seules variations de température. Le Dr Seebeck démontra l'existence de ces courans en l'année 1821, et cette observation fut une des premières et des plus ingénieuses applications de la découverte de M. OErsted. L'appareil de M. Seebeck est représenté dans la *figure* 167; il se compose d'un cylindre *a* de bismuth ou d'antimoine, aux deux extrémités duquel on a soudé une lame de cuivre lml' avec de la soudure ordinaire; on peut le tenir à la main par la partie *m*, qui est pour cette raison enveloppée de soie ou d'étoffe. Ce circuit métallique, dans son état naturel, n'exerce aucune action sur une aiguille aimantée qu'on lui présente d'une manière quelconque; mais si l'on chauffe une des soudures *s* ou s', il devient à l'instant, dans tous ses points, capable d'imprimer divers mouvemens aux aiguilles et même aux substances magnétiques. Ces mouvemens indiquent d'une manière certaine la présence d'un courant électrique qui traverse tout le circuit métallique, et toujours dans le même sens, aussi long-temps que la soudure échauffée conserve son élévation de température au dessus de la soudure qui ne l'est pas. Par exemple, si c'est la soudure *s* qui ait été présentée quelques instans sur la flamme d'une bougie ou près d'un corps chaud, ou seulement touchée avec la main,

l'appareil exerce alors sur l'aiguille aimantée les mêmes actions que pourrait exercer un courant traversant le circuit dans le sens $s\,s'\,l'\,m\,l$. De l'identité des effets il faut bien déduire l'identité des causes, et conclure que dans ces circonstances la chaleur excite dans les métaux des courans électriques.

En laissant la soudure s revenir à son état naturel, et en chauffant la soudure s', on obtient le même effet en *sens inverse*, le courant se dirige alors suivant $s'\,s\,l\,m\,l'$.

En portant les deux soudures à la même température, ces effets opposés doivent se détruire, et c'est aussi ce que l'expérience confirme.

On démontre pareillement que refroidir l'une des soudures en laissant l'autre à son état naturel, est la même chose que chauffer celle-ci.

C'est donc la différence seule de température aux deux points de jonction, qui détermine ce singulier phénomène de circulation électrique.

La chaleur paraît n'être ici qu'une cause accidentelle et non pas une force qui donne l'impulsion à l'électricité. Nous savons que la force électro-motrice existe au contact de tous les corps, qu'elle existe par conséquent au contact de l'antimoine et du cuivre, et que, certainement, dans l'appareil de la *figure* 167, le cylindre d'antimoine possède l'un des fluides, tandis que le cuivre possède l'autre; la circulation ne peut pas s'établir, parce que, à température égale, les forces électro-motrices sont égales entre elles aux deux soudures ou aux deux contacts s et s'; mais si une cause quelconque donne à l'une de ces forces électro-motrices l'avantage sur l'autre, à l'instant la circulation s'établira comme si l'on avait remplacé, par une simple rondelle humide, le contact où se trouve la force la plus faible.

Ce changement de la force électro-motrice peut se faire de deux manières : on peut concevoir que les tensions électriques des deux métaux qui se touchent augmentent ou

diminuent proportionnellement, ou bien que les tendances électriques de ces métaux éprouvent elles-mêmes quelques modifications; or, la chaleur produit ce double phénomène, car, de deux métaux qui se touchent, celui qui était positif à une certaine température peut quelquefois devenir négatif à une autre température; ainsi les courans thermo-électriques paraissent n'être qu'une conséquence de ces modifications diverses, que la chaleur imprime aux tendances électriques.

Pour étudier les corps, sous ce rapport, on peut employer, avec avantage, le multiplicateur représenté dans la *figure* 138, en disposant l'expérience de la manière suivante : 1°. On fera plonger chacune des extrémités du fil du multiplicateur dans un godet de mercure, maintenu soigneusement à la température zéro; 2°. on prendra un fil double, c'est-à-dire, composé des deux métaux que l'on veut soumettre à l'expérience; ils seront soudés bout à bout, comme on le voit dans la *figure* 168, pour l'or et le palladium; ce fil double plongera par chacune de ses extrémités *o* et *p* dans l'un des godets de mercure, où viennent déjà les extrémités du multiplicateur; 3°. Enfin, l'on portera la soudure *s* à une température constante, et l'on observera la déviation correspondante de l'aiguille. Il suffira de savoir ensuite quelle est la force correspondante à chaque déviation.

Plusieurs physiciens ont essayé d'établir entre les métaux l'ordre suivant lequel ils paraissent positifs ou négatifs dans le circuit thermo-électrique : nous nous bornerons à indiquer le tableau suivant, que l'on doit aux intéressantes recherches de M. Cumming; il suffit de le comparer à celui que nous avons rapporté (412), pour voir à quel point la chaleur change les dispositions électriques des différens corps. Dans ce tableau, chaque métal est positif avec tous ceux qui le suivent, et négatif avec ceux qui le précèdent.

1 Bismuth.	11 Rhodium.
2 Mercure.	12 Laiton.
3 Nickel.	13 Cuivre.
4 Platine.	14 Or.
5 Palladium.	15 Zinc.
6 Cobalt.	16 Charbon.
7 Manganèse.	17 Plombagine.
8 Argent.	18 Fer.
9 Étain.	19 Arsenic.
10 Plomb.	20 Antimoine.

424 bis. *Thermomètre thermo-électrique.* — Je décrirai ici sous cette dénomination un petit appareil qui montre d'une manière frappante combien les moindres changemens de température sont efficaces pour exciter des courans électriques. Les lois de la conductibilité thermo-électrique, qui m'ont conduit à la construction de cet instrument, sont développées dans le chapitre suivant.

Le thermomètre thermo-électrique est représenté dans la *figure* 169.

La *figure* 170 en représente une coupe verticale, et la *figure* 171 une vue horizontale.

BB, *figure* 171, est une lame de bismuth d'environ un centimètre d'épaisseur, de 7 ou 8 centimètres de largeur, et de 20 centimètres de longueur. A chacune de ses extrémités, en *b* et *b'*, elle porte un petit cylindre d'un ou deux centimètres de diamètre, et de deux ou trois centimètres de hauteur. Ces petits cylindres sont aussi en bismuth; ils font corps avec la lame; ils ont été fondus avec elle.

c d c' d' est une lame de cuivre recourbée, comme on le voit sur la figure, et portant deux petits appendices *c* et *c'*, par lesquels elle est soudée au bismuth; elle ne doit le toucher en aucun autre point. Les appendices circulaires peuvent être dorés à leur surface supérieure.

Les deux lames de bismuth et de cuivre forment ainsi un

circuit fermé, dont les deux soudures sont en c et c'; un changement de température dans l'un de ces points doit déterminer un courant; et voici comment le courant est rendu sensible. On suspend à un fil de soie un système compensé analogue à celui de la *figure* 45; il est composé de 3 aiguilles à coudre, plantées perpendiculairement dans un brin de paille; l'aiguille inférieure $a\,b$ est entre les deux lames de cuivre et de bismuth; c'est pour cela que l'on a ménagé une fente dans la lame de cuivre, *figure* 171; l'aiguille du milieu $a'b'$ est immédiatement au dessus du cuivre; et l'aiguille supérieure $a''b''$ est plus ou moins inclinée pour achever la compensation et la rendre plus ou moins complète.

Les aiguilles sont couvertes d'une cloche, et l'on peut aussi couvrir avec de petites cloches les soudures c et c', *figure* 169.

Cet instrument est d'une telle sensibilité qu'il suffit de souffler sur l'une des soudures pour que l'aiguille marche de plusieurs degrés, et, pour lui faire faire une révolution entière, il suffit de toucher un seul instant avec le bout du doigt l'une des deux soudures.

On peut noircir l'une des deux soudures au noir de fumée, et se servir de cet instrument pour étudier les phénomènes de la chaleur rayonnante, ou pour observer les effets calorifiques de la lumière.

CHAPITRE V.

De la conductibilité.

425. *Conductibilite des métaux.* — On a depuis long-temps séparé les corps en trois grandes sections ou en trois ordres, par rapport à leur faculté conductrice; dans le premier ordre se rangent les métaux, sans exception, à l'état solide ou liquide; dans le deuxième ordre on trouve tous les liquides et les diverses dissolutions qu'ils peuvent donner, presque toutes les substances végétales et animales, et la plupart des substances minérales; enfin, dans le troisième ordre, on ne compte qu'un très-petit nombre de substances, comme le soufre, le verre et quelques pierres précieuses, les résines, la soie, la laine et plusieurs fourrures. Mais, pour établir des rapports numériques entre les conductibilités des diverses substances d'un même ordre, on éprouve de grandes difficultés. Autrefois on ne pouvait, par exemple, comparer entre eux les différens métaux que par la facilité plus ou moins grande avec laquelle ils transmettent les décharges électriques, et par les effets de chaleur qu'ils en éprouvent; mais rien n'est véritablement comparable dans ces expériences; les décharges elles-mêmes ne peuvent être graduées avec exactitude, et l'élévation de température que prennent les corps par la transmission de l'électricité, est un phénomène complexe qui dépend de leur capacité pour la chaleur, aussi-bien que de leur conductibilité électrique.

La pile de Volta donne des moyens de comparaison beau-

coup plus précis; plusieurs physiciens l'ont employée à résoudre la question importante de la conductibilité des métaux; mais nous nous bornerons à rapporter ici les résultats qui ont été obtenus par sir H. Davy.

Concevons une pile de Wollaston, composée d'un grand nombre de paires, et chargée d'une eau acidulée assez faible pour qu'elle puisse conserver pendant long temps une force sensiblement constante; supposons en outre que l'on puisse employer à volonté tel nombre de paires que l'on juge convenable, soit pour décomposer de l'eau acidulée, soit pour produire d'autres phénomènes chimiques. Lorsque la pile est en activité pour produire ces phénomènes, on peut joindre ses deux pôles par un fil de métal, et il est évident qu'une partie du courant passe alors par ce fil, tandis que l'autre partie continue d'agir chimiquement, mais avec une moindre intensité. On peut donc prendre un tel nombre de paires et un fil de telles dimensions, que le phénomène chimique cesse complétement: alors on dit que le fil *décharge* la pile, et cela ne signifie pas qu'il lui enlève toute son électricité, mais seulement que, s'il lui en enlevait un peu moins, le phénomène chimique commencerait à se reproduire: c'est par ce moyen très-ingénieux que sir H. Davy est parvenu à établir deux lois fondamentales de la conductibilité des métaux, savoir :

Premièrement, que la conductibilité est proportionnelle au carré du diamètre des fils, ou en général à la surface de la section des fils ou des lames; secondement, qu'elle est en raison inverse de leur longueur.

Quant au rapport numérique de la conductibilité des divers métaux, sir H. Davy a trouvé les résultats suivans, qui sont exprimés, en supposant que la faculté conductrice du platine soit représentée par 100.

Argent.	600	Or.	400
Cuivre.	550	Plomb. . . .	380

Étain.	109	Fer.	82
Platine.	100		

La découverte de l'électro-magnétisme a fourni des moyens de comparaison plus simples et peut-être encore plus précis; M. Becquerel en a profité pour confirmer les deux lois générales que nous venons de rapporter, et pour comparer entre eux divers métaux. Le procédé dont il a fait usage semble soumis à plusieurs causes d'erreurs; mais son habileté à expérimenter a dû sans doute l'en garantir, et nous donnons avec confiance les nombres auxquels il est parvenu. La conductibilité du platine est encore représentée par 100 (*Ann. de Phys. et de Chim.*, t. XXXII, page 420).

Cuivre.	609	Platine.	100
Or.	571	Fer.	95
Argent.	447	Plomb.	50
Zinc.	174	Mercure.	21
Étain.	94	Potassium. . . .	8

Dans une série d'expériences que j'ai faites avec une grande pile d'un seul élément, je suis arrivé aux résultats suivans :

Argent à 0,986. . .	860	Rosette.	224
Cuivre rouge. . . .	738	Laiton.	194
Argent 1er tit. 0,948.	656	Fer.	121
Or fin.	623	Or à 18 karats. . .	109
Argent 2e tit. 0,800.	569	Platine.	100

Le courant de la pile n'avait à traverser que deux gros fils en cuivre, puis le fil dont on voulait déterminer la faculté conductrice, et un grand cercle en cuivre au centre duquel était suspendue une aiguille aimantée dont on observait les déviations.

La conductibilité m'a paru très-exactement proportionnelle à la section des fils, depuis les diamètres les plus fins

que j'aie pu obtenir jusqu'aux diamètres de trois lignes environ, au delà desquels je n'ai pas poussé mes expériences.

Pour la loi de la raison inverse de la longueur, elle ne m'a paru exacte que sous une condition : dans mon appareil, les forces électro-magnétiques qui servaient de mesure à la conductibilité se trouvaient proportionnelles aux tangentes des déviations de l'aiguille; et en employant successivement des longueurs l, l', l'', etc., d'un même fil, les tangentes t, t', t'', etc., des déviations, n'étaient jamais en raison inverse de ces longueurs : mais elles étaient en raison inverse de ces longueurs augmentées chacune d'une même quantité λ; ainsi on avait

$$\frac{\lambda+l}{\lambda+l'}=\frac{t'}{t}, \qquad \frac{\lambda+l}{\lambda+l''}=\frac{t''}{t}, \qquad \frac{\lambda+l'}{\lambda+l''}=\frac{t''}{t'}, \text{ etc.}$$

Cette quantité λ, qui restait constante pour les diverses longueurs d'un même fil, changeait avec la nature de la substance, et pour chaque substance elle était en raison inverse de la section du fil. Il me semble par conséquent que la conductibilité est rigoureusement en raison inverse de la longueur des fils, pourvu que l'on tienne compte de la résistance qu'éprouve l'électricité à traverser le liquide qui sépare les élémens de la pile, et à parcourir les divers conducteurs qui doivent l'amener aux fils qui sont directement soumis à l'observation. Ainsi, quand on opère, par exemple, sur un fil d'argent de 1 millimètre de diamètre, il faut concevoir que tous les conducteurs dont je viens de parler réduisent la force du courant autant que pourrait la réduire un fil d'argent de 1 millimètre de diamètre, et d'une certaine longueur, par exemple, de 1 mètre; alors si l'on force le courant à passer successivement par deux fils pareils, l'un de 1 mètre et l'autre de 2 mètres, les tangentes des deux actions seront entre elles comme 2 est à 3, et non pas comme 1 est à 2, qui sont les deux longueurs véritablement soumises à l'expérience.

Sir H. Davy a démoutré que la conductibilité d'une même substance diminue à mesure que la température s'élève, et qu'elle augmente au contraire à mesure que la température s'abaisse. On en peut faire l'expérience sur un fil exposé entre les deux pôles de la pile; lorsqu'il est porté au rouge par le courant, si on le chauffe artificiellement dans une partie de sa longueur, on le voit devenir moins rouge dans les points qui ne sont pas frappés par la flamme; et au contraire, si on le refroidit dans une certaine étendue, les parties voisines prennent un plus vif éclat. D'après cela, il est très-probable que le rapport de la conductibilité change aussi avec la température et que les tableaux précédens présenteraient un ordre tout différent pour des températures un peu élevées.

426. *Conductibilité des métaux pour les courans thermo-électriques.* Pour connaître la loi suivant laquelle un courant thermo-électrique s'affaiblit lorsqu'on le fait passer par des longueurs successivement croissantes d'un même fil, j'ai pris des fils de cuivre revêtus de soie, ayant un demi-millimètre de diamètre et coupés bout à bout dans la même bobine, l'un de 10 mètres de longueur et l'autre de 1 mètre seulement. Le premier a été enroulé sur le cadre d'un multiplicateur de manière à faire dix tours; la longueur excédante a été enroulée à part pour qu'elle ne puisse exercer aucune action électro-dynamique; le second fil a été enroulé sur le même cadre de manière qu'il ne fasse qu'un seul tour Cela posé, les extrémités du premier fil ont été soudées chacune à l'extrémité d'un cylindre de bismuth de douze pouces de longueur et d'un demi-pouce de diamètre, et les extrémités du second ont été pareillement soudées aux extrémités d'un autre cylindre de bismuth, ayant une section quadruple de celle du premier et une longueur égale seulement à ses 4 dixièmes. Dans chaque circuit l'une des soudures a été mise à zéro et l'autre à 100°, mais avec cette attention, que les courans fussent dirigés

en sens contraire dans les fils : alors l'aiguille très-sensible du multiplicateur est restée immobile. Donc le courant était dix fois plus faible dans le long fil, car il agissait par dix tours dans le multiplicateur, tandis que le fil d'un mètre n'agissait que par un tour.

Donc l'intensité des courans thermo-électriques est en raison inverse de la longueur du circuit qu'ils parcourent.

Pour reconnaître si cette intensité est proportionnelle à la setcion du circuit métallique, j'ai pris le fil précédent de 1 mètre, et un autre fil pareil ayant une section dix fois plus grande et une longueur décuple. Ces fils ont été enroulés comme les précédens, mais en faisant chacun un seul tour sur le cadre du multiplicateur. Le courant a été dirigé en sens inverse dans les fils, et l'aiguille est restée encore parfaitement immobile. Donc l'intensité est bien en raison directe de la section du circuit, puisqu'un circuit dix fois plus long, mais ayant une section décuple, produit exactement le même effet.

La première conséquence qui se déduit de ces principes, c'est que pour les courans thermo-électriques le multiplicateur ne multiplie pas ; car si l'on veut, par exemple, faire cent tours sur le cadre du multiplicateur, il faut prendre une longueur de fil cent fois plus grande que pour faire un tour ; et le courant se trouve réduit par l'augmentation de longueur autant qu'il est augmenté par le redoublement des tours.

Le thermomètre thermo-électrique qui a été décrit précédemment (*424 bis*) repose sur cette donnée fondamentale : c'est pour cela que la lame de bismuth doit être large et épaisse. Si la section de ce circuit était mille fois plus grande que la section d'un autre circuit semblable et de même longueur, son effet sur l'aiguille serait aussi mille fois fois plus grand, et il conserverait cet avantage lors même que le circuit le plus mince serait cent fois multiplié, pourvu qu'il prenne alors une longueur cent fois plus grande.

Ces résultats m'ont servi à comparer les conductibilités des différens métaux. Sans entrer ici dans la description détaillée des appareils, je dirai seulement que j'employais deux courans thermo-électriques égaux; que le premier était affaibli en traversant le fil métallique soumis à l'expérience, et que le second était affaibli précisément de la même quantité en traversant des longueurs plus ou moins grandes d'un autre fil qui servait de terme de comparaison.

Voici maintenant les résultats des expériences. La conductibilité du mercure est représentée par 100, et toutes les autres sont rapportées à cette mesure, parce qu'il est très-facile d'avoir du mercure parfaitement pur.

Tableau de la Conductibilité des métaux pour les courans thermo-électriques.

Noms des substances.	Diamètre du fil.	Longueurs soumises à l'expérience.			Conductibilité, celle du mercure étant 100.
	mm	mill.	mm	mill.	
Palladium.	0,176	1900	1200	500	5791
Argent 963 de fin. .	0,174	2000	1500	200	5152
Argent 900.	0,194	id.	id.	id.	4755
Argent 857.	0,178	1200	800	400	4221
Argent 747.	0,179	1200	600	»	3882
Or pur.	0,176	1000	500	»	3975
Or 951.	0,176	600	300	»	1338
Or 751.	0,176	400	200	»	714
Cuivre pur.	0,182	2000	1000	500	3838
Id. recuit.	id.	id.	id.	id.	3842
Platine.	0,186	800	600	300	855
Laiton.	0,182	»	»	»	1200 900
Acier fondu. . . .	»	»	»	»	800 500
Fer.	»	»	»	»	700 600

Le palladium, le platine, l'or, l'argent et le cuivre ont

été purifiés à la monnaie : je les dois à la bienveillante amitié de M d'Arcet et de M. Bréant; les autres métaux ont été pris dans le commerce ou préparés directement et alliés en diverses proportions.

On voit que le palladium est le plus conducteur des métaux; viennent ensuite l'argent, l'or et le cuivre : le mercure est le plus mauvais conducteur des corps que j'ai soumis à l'expérience; sa conductibilité est presque soixante fois moindre que celle du palladium.

La présence des substances étrangères altère singulièrement la conductibilité; ce sera un excellent moyen de reconnaître la pureté des métaux.

Le laiton, l'acier et le fer ont été soumis à un grand nombre d'expériences; j'ai rapporté seulement les limites entre lesquelles tous les résultats se trouvent compris.

La température n'a qu'une faible influence sur la conductibilité de certains corps : par exemple, de 0 à 100° le mercure ne varie que de quelques centièmes : mais entre les mêmes limites le fer et l'acier éprouvent une prodigieuse variation, leur conductibilité est souvent réduite au tiers; la simple chaleur de la main produit des effets très-sensibles; et ce qui semble encore plus étonnant, c'est qu'il suffit de faire rougir une étendue de quelques millimètres sur la longueur d'un fil de fer ou d'acier pour que sa conductibilité devienne trois ou quatre fois moindre.

426 bis. *De la mesure des courans thermo-électriques.* On peut déduire de ce qui précède un moyen de comparer, d'une manière absolue, les intensités des courans thermo-électriques. En effet, concevons une source thermo-électrique constante, et supposons que le courant auquel elle peut donner naissance soit immédiatement reçu dans une colonne de mercure d'une longueur et d'une section données. Il est évident, par ce qui précède, que le courant deviendra deux fois, trois fois ou dix fois plus intense si l'on réduit la colonne de mercure à la moitié, au tiers ou à la

dixième partie de sa longueur, qu'il deviendra mille fois plus faible si l'on en augmente mille fois la longueur, et qu'il changera pareillement dans des proportions connues si l'on change la section de la colonne dans un rapport déterminé.

Ainsi dans cette hypothèse l'intensité d'un courant thermo-électrique serait définie d'une manière exacte et absolue pour tous les observateurs, dès qu'on aurait donné les dimensions de la colonne de mercure qu'il parcourt. La seule difficulté pour la mesure des courans est donc de trouver une source thermo-électrique constante, et de réduire les résultats à ce qu'ils seraient si l'électricité passait immédiatement de cette source dans la colonne de mercure. Or il résulte de toutes les expériences que j'ai faites sur ce point que le contact du bismuth et du cuivre donne une source tout-à-fait constante entre les mêmes limites de température; qu'on n'observe à cet égard qu'une différence insensible entre les différentes espèces de bismuth du commerce et des laboratoires, et entre les différentes espèces de cuivre des fabriques d'Imphy et de Romilly; que le métal soudant et l'étendue de la soudure n'apportent aucune variation dans les résultats, pourvu toutefois (et ceci est une condition essentielle), pourvu que la soudure soit bien exactement à la même température dans toutes ses parties. Au reste, il y a un moyen simple et sûr de vérifier ce fait: c'est d'observer la conductibilité du cuivre et du bismuth comparativement à celle du mercure; et les conductibilités une fois connues, on peut substituer aux fils de cuivre et aux tiges de bismuth une longueur correspondante à la colonne de mercure, et obtenir ainsi le même résultat que si le courant passait directememt de la source thermo-électrique dans la colonne de mercure, dont les dimensions caractérisent l'intensité. Au moyen de ces principes on peut facilement construire des galvanomètres comparables: en effet, prenons un fil dont la conductibilité soit connue, formons-en un galvanomètre, et observons la déviation qu'il

éprouve par l'effet d'une source thermo-électrique connue; rompons le circuit pour forcer le courant à passer par des longueurs doubles, triples, et les forces deviendront deux fois, trois fois plus petites, etc.; et l'on formera une table des déviations correspondantes, Ainsi chaque instrument sera gradué, et pour comparer ensemble deux de ces instrumens, il suffira de tenir note de l'intensité absolue de la source que l'on aura prise pour unité dans la construction de chacun d'eux.

427. *Conductibilité des liquides.* — Parmi les recherches qui ont été faites sur ce sujet, celles du professeur Marianini, de Venise, sont, à ma connaissance, les plus complètes et les plus exactes. Voici le tableau de ses résultats. Les diverses dissolutions dont il se compose sont formées de 1 partie de la substance dans 100 parties d'eau distillée. La conductibilité de l'eau de mer est représentée par 100; les expériences ont été faites à 3 et à 6° de température.

Hydrocyanate de soude. . .	10,96	Carbonate de soude.	69,02
Acide hydrocyanique. . . .	18,27	Acide benzoïque.	70,67
Ammoniaque liquide. . . .	26,45	Mélanate d'ammoniaque . .	71,15
Soude.	32,06	Sulfate de soude.	74,02
Phosphate de potasse. . . .	44,74	Benzoate de potasse.	78,56
Borax.	45,31	Nitrate de potasse.	78,03
Phosphate de soude.	46,00	Sulfate de potasse.	80,00
Tartrate de potasse et d'ammoniaque.	50,07	Sel marin.	84,79
Sulfate de zinc.	51,64	Sulfate acide d'alumine et de potasse.	85,00
Chlorate de baryte.	53,23	Acide citrique.	85,71
Potasse.	55,68	Acide acétique.	87,00
Chlorate de fer au *minimum*.	56,53	Tartrate de potasse.	92,00
Nitrate de chaux	57,00	Acide tartrique	98,66
Acétate de potasse	59,02	Hydrochlorate de chaux. . .	110
Nitrate de baryte.	60,00	Acide phosphorique avec un peu d'acide phosphoreux.	127
Protosulfate de fer.	62,26	Hydrochlorate d'ammoniaque ferrugineux.	136
Tartrate acide de potasse. .	62,04	Oxalate de potasse.	149
Sulfate de magnésie.	62,04	Hydrochlorate d'ammoniaque.	150
Acétate de soude.	64,09		
Carbonate de potasse. . . .	66,07		
Chlorate de potasse.	68,09		

Acétate de cuivre.	154	Protonitrate de mercure. . .	278
Acide hydrochlorique. . . .	164	Nitrate d'argent.	298
Acide oxalique.	176	Hydrochlorate d'or.	307
Acide sulfurique.	239	Acide nitrique.	358
Deutosulfate de cuivre. . .	258	Hydrochlorate de platine. .	418

Il paraît que la conductibilité de l'eau distillée serait seulement de 1 et celle de l'alcool de 0,323 (*Bulletin des Annonces*, mars 1827, pag. 190).

428. *De l'inégale conductibilité de diverses substances pour les fluides électriques.* — On doit à M. Erman cette expérience curieuse : quand une pile est isolée et qu'on observe par des électroscopes très-sensibles les tensions égales qu'elle donne à chaque pôle, si l'on vient toucher le pôle positif avec un morceau de savon sec, la tension de ce pôle disparaît et l'électricité vitrée passe au sol; il en est de même si l'on touche le pôle négatif : mais la pile ayant repris sa charge, si l'on met le savon entre ses pôles, ni l'un ni l'autre fluide ne disparaît; elle reste chargée comme si le savon était un corps isolant : enfin, et ceci est encore plus remarquable, tandis que le savon est ainsi entre les pôles, si l'on vient le toucher avec une tige de métal, *en un point quelconque* de sa surface, le fluide *résineux seul* s'écoule dans le sol, et le fluide vitré semble alors arrêté par le savon. Donc, dans ces circonstances, le savon est *conducteur* du fluide résineux et *non-conducteur* du fluide vitré.

La flamme de l'alcool présente les mêmes phénomènes (M. Biot); seulement, pour elle, c'est le fluide résineux qui reste isolé.

429. *Propriétés que prennent les conducteurs métalliques placés, sous certaines conditions, dans le circuit de la pile.* — M. Aug. de La Rive a publié récemment (*Ann. de Phys. et de Chimie*, t. XXXVI, pag. 54) un mémoire intéressant dans lequel il fait connaître une propriété nou-

velle des conducteurs métalliques. Nous regrettons de ne pouvoir donner ici que le résumé de son travail :

« 1°. Les corps solides qui ont servi de conducteurs à l'électricité acquièrent, quand ils sont placés dans les circonstances favorables, la propriété de donner lieu à un courant, propriété que l'on peut nommer *pouvoir électro-dynamique ;*

» 2°. Ces conducteurs ne peuvent acquérir et développer ce pouvoir que lorsqu'une portion du circuit renferme un liquide conducteur non métallique ;

» 3°. Les conducteurs liquides placés dans les mêmes circonstances ne sont pas susceptibles, comme les solides, d'acquérir cette propriété ;

» 4°. Toutes les circonstances qui accompagnent la production du phénomène semblent conduire à la conséquence que le courant s'établit dans les conducteurs par une décomposition et recomposition successive du fluide naturel de chaque molécule, et qu'il existe dans les conducteurs solides une force coercitive qui peut les maintenir, pendant un temps plus ou moins long, dans l'état électrique qui leur a été imprimé par le passage du courant. »

Les expériences se disposent de la manière suivante : On termine chaque pôle de la pile par un fil en platine, et l'on fait passer le courant pendant quelques minutes dans un liquide conducteur; ensuite, on peut toucher les fils de platine, les détacher, les enlever, les laver même, les couper, ou leur faire subir diverses actions mécaniques, et après cela les mettre chacun à l'une des extrémités du multiplicateur; alors, si on les fait communiquer entre eux *directement*, on n'observe aucun effet; si on les joint par un conducteur métallique, on n'observe rien encore; mais si on les fait plonger l'un et l'autre dans une dissolution saline, à l'instant il se détermine un courant qui traverse le multiplicateur en se dirigeant du fil qui était au pôle positif

au fil qui était au pôle négatif. Cette propriété peut se conserver dans les fils pendant plusieurs heures après qu'ils ont reçu l'action de la pile.

430. *Piles secondaires de Ritter.* — La propriété dont nous venons de parler semble avoir quelque liaison remarquable avec les piles que Ritter avait construites autrefois, peu de temps après la découverte du galvanisme, et que M. Marianini vient de soumettre à de nouvelles recherches. Ces piles sont simplement composées de disques d'un *même* métal, alternant dans un ordre quelconque avec des rondelles humides de drap ou de carton. Lorsqu'on les expose pendant quelque temps entre les deux pôles d'une forte pile, elles se chargent et deviennent capables de reproduire à leur tour, mais avec une moindre intensité, tous les phénomènes des véritables piles: c'est pour cela qu'on les appelle des piles secondaires. Une fois qu'elles sont chargées, elles peuvent pendant long-temps conserver leurs propriétés; et, suivant l'observation de M. Marianini, on peut alors intervertir l'ordre des disques, sans pour cela détruire leur activité. Le pôle positif des piles secondaires se trouve à l'extrémité qui touchait le pôle positif de la pile, *et vice versâ*, son pôle négatif correspond au fil négatif; cette distribution n'est pas changée par le retournement des rondelles humides; enfin, l'intensité électrique paraît proportionnelle au nombre des alternatives du métal et du conducteur intermédiaire.

Ces phénomènes curieux sont une mine nouvelle, et puisqu'elle est exploitée par MM. de La Rive et Marianini, nous pouvons être assurés qu'elle deviendra bientôt une mine féconde pour la science.

CHAPITRE VI.

Des Phénomènes électro-chimiques.

431. *De l'influence que l'état électrique des corps exerce sur leurs affinités chimiques.* — Le docteur Wollaston a démontré depuis long-temps qu'une lame métallique plongée dans un acide, ou dans une dissolution saline, n'éprouve pas les mêmes effets, si elle reste libre, ou si elle est touchée par une autre substance métallique, qui plonge aussi dans le liquide (*Ann. de Chimie*, t. XVI, page 45). Par exemple, en tenant un fil ou une lame de zinc dans une éprouvette remplie d'acide sulfurique très-étendu, on n'observe qu'une faible action chimique; si l'on y plonge en même temps un fil de platine ou d'argent, le phénomène reste le même, et le nouveau métal n'éprouve aucun effet; mais si l'on établit *à l'extérieur* le contact entre les deux métaux plongés, l'action chimique prend à l'instant une vive intensité : les bulles d'hydrogène vont se dégager en foule sur le *platine* ou l'*argent*, et le zinc s'oxide beaucoup plus vite. On peut faire une expérience semblable avec le cuivre et le zinc; et, en général, un métal seul, même quand il n'aurait pas d'action sur le liquide dans lequel il plonge, peut souvent en prendre une, par son contact avec un autre métal.

Les espèces de végétations curieuses, connues sous les noms d'*arbre de Saturne*, d'*arbre de Diane*, etc., reposent exactement sur le même principe, comme M. Grot-

thuss l'a démontré dans un Mémoire très-intéressant et rempli de vues ingénieuses (*Ann. de Chim.*, t. LXIII, pag. 1). On sait que l'arbre de Saturne se forme dans une dissolution d'acétate de plomb ; cette dissolution étant contenue dans un flacon à grand goulot, on fixe au bouchon du flacon une lame de zinc, qui plonge dans le liquide à une certaine profondeur ; l'appareil étant ensuite abandonné à lui-même, l'opération s'accomplit *lentement*, *et, après quelques jours, on observe un arbre brillant composé de paillettes de plomb revivifié ;* il semble prendre racine sur le zinc, et de là il s'étend dans le flacon en ramifications singulières. Pendant la revivification du plomb, il y a oxidation du zinc ; ainsi, à l'instant où une paillette métallique se dépose à l'extrémité d'un rameau pour lui donner un nouvel accroissement, l'oxigène qu'elle a quitté va se précipiter sur le zinc pour se combiner avec lui. Le zinc et le plomb, déjà revivifiés, forment donc une véritable pile qui décompose l'acétate et l'oxide de plomb, attirant le métal au pôle négatif, et l'oxigène au pôle positif.

Les mêmes principes expliquent la formation de l'arbre de Diane, que l'on obtient en versant sur du mercure une dissolution de nitrate d'argent suffisamment concentrée. Ils expliquent pareillement les ramifications brillantes que l'on obtient aussi en plongeant une lame de zinc dans une dissolution d'hydrochlorate d'étain.

432. *Corrosion du cuivre des vaisseaux.* — Presque tous les métaux éprouvent des altérations plus ou moins profondes, lorsqu'ils sont exposés à l'influence de l'air ou de l'humidité, ou à l'influence encore plus destructive de l'eau de mer ; ils sont, avec le temps, oxidés, corrodés et complètement dénaturés. Ces effets nous semblent naturels parce que nous les voyons se reproduire sans cesse ; et nous disons que tout s'use et se détruit avec le temps, sans prendre garde que toute destruction est un phénomène chimique aussi-bien que toute reproduction. Il appartenait

donc à la chimie d'expliquer toutes ces altérations lentes ou rapides, auxquelles sont exposés les métaux, et nous pouvons dire aujourd'hui qu'elle fait mieux que de les expliquer, puisqu'elle donne des moyens efficaces pour les prévenir ou du moins pour les atténuer. On a remarqué souvent que des barres de fer placées dans les mêmes lieux et sous les mêmes influences se détruisent très-inégalement; qu'il en est de même des couvertures en zinc ou en plomb; et de même aussi des lames de cuivre qui forment le doublage des vaisseaux. Le Conseil de l'Amirauté ayant appelé l'attention de la Société Royale de Londres sur cette importante question, sir H. Davy est parvenu à en donner une solution qui ne paraît pas moins utile pour les arts qu'elle est féconde pour la science. Sir H. Davy attribue la corrosion du cuivre qui double les vaisseaux à l'état électrique, dans lequel ce métal se constitue par son contact avec l'eau de mer. Il s'oxide aux dépens de l'eau, et forme ensuite des carbonates ou d'autres sels; donc il agit comme le pôle positif d'une pile qui attire à lui l'oxigène; ainsi, en donnant au cuivre un état électrique négatif suffisamment énergique, il ne pourra plus s'oxider, et s'il arrive encore qu'il décompose l'eau et les sels, c'est l'hydrogène qui se portera sur lui, ou les substances alcalines résultant de la décomposition. Telle est en peu de mots la théorie de sir H. Davy. Or, rien n'est plus facile que de rendre le cuivre électro-négatif, il suffit pour cela de le toucher avec un métal qui soit électro-positif avec lui; le zinc pourrait remplir cette condition, mais le fer et la fonte la remplissent encore mieux et plus économiquement. En effet, si l'on applique sur le cuivre, à la proue et à la poupe du vaisseau, des lames de fer ou de fonte de dimensions convenables, ces lames s'oxident et peuvent être remplacées facilement; mais le cuivre est protégé, l'eau n'a plus de prise sur lui, et il peut parcourir les mers sans perdre son éclat métallique; seulement il y a une proportion à garder entre la surface totale

du cuivre et la surface des lames qui le protégent; si les plaques de fonte offrent une surface trop petite, la corrosion du cuivre est seulement diminuée; si elles offrent une surface trop grande, le cuivre prend alors une trop grande puissance négative, il décompose en *sens inverse* l'eau de mer et les sels qu'elle contient, et bientôt sa surface est couverte de dépôts terreux qui deviennent un grand obstacle à la marche rapide du bâtiment, à cause des plantes et des coquillages nombreux qui viennent s'y attacher.

Après diverses expériences faites sur des vaisseaux qui ont parcouru les mers équatoriales ou les mers polaires, sir H. Davy conseille de donner aux lames de fer une surface qui soit la 250e partie ou $\frac{1}{250}$ de la surface de cuivre qu'il s'agit de protéger.

On conçoit qu'il n'est pas nécessaire que le cuivre soit en contact immédiat avec le métal protecteur; il suffit seulement qu'il n'en soit séparé que par un conducteur assez parfait. Ainsi le cuivre est préservé par du zinc dont il est séparé par un fil d'argent de 40 pieds de long et d'environ $\frac{1}{1000}$ de pouce de diamètre; il pourrait même en être séparé par du charbon, du coton ou de la filasse imprégné d'eau de mer.

Il devient facile, de cette manière, de faire une expérience curieuse qui montre bien l'origine et le développement de la force préservatrice. On prend plusieurs vases remplis d'eau de mer, que l'on fait communiquer entre eux par de la filasse dont les faisceaux ont environ $\frac{1}{5}$ de pouce d'épaisseur. Dans le premier, on met un fil de cuivre roulé en spire et attaché à un morceau de zinc; dans le second et les suivans, on met du fil pareil qui ne touche aucun autre métal, et alors on observe divers phénomènes. Le cuivre du premier vase est rapidement couvert de dépôts alcalins, de cristaux de carbonate de soude et même de paillettes de zinc revivifié; celui du deuxième est moins chargé de dépôts; celui du troisième conserve à peu près

son état naturel; celui du quatrième éprouve un commencement de corrosion; et celui du cinquième vase et des vases suivans est complètement altéré; la force protectrice ne s'étend pas jusqu'à lui.

Voici une autre expérience qui est aussi très-digne d'attention. Une tige de fer et une tige de cuivre sont en communication par de bons conducteurs; on les plonge chacune dans un vase d'eau de mer, et ces deux vases communiquent entre eux par de la filasse humide; quelques gouttes de potasse versées dans le vase de fer diminuent le pouvoir négatif de l'autre vase, car le dépôt de carbonate de chaux et de magnésie devient moins abondant; quelques gouttes de plus le rendent tout-à-fait nul, et l'équilibre chimique s'établit en même temps que l'équilibre électrique. Enfin, si l'on continue de verser encore un peu de solution alcaline, c'est le fer qui devient négatif et le cuivre positif, comme on en peut juger par la teinte verte que prend l'eau du vase qui le contient, et par la rapide corrosion qu'il éprouve.

Ces résultats sont une preuve assez frappante de l'influence que l'état électrique des corps peut exercer sur leurs affinités mutuelles, et sur la nature des combinaisons qu'elles produisent; et quand on sait qu'il y a une force électro-motrice au contact de toutes les substances hétérogènes, que son intensité est sans cesse variable avec la température, et que la conductibilité peut répandre instantanément, jusqu'à de grandes distances, les fluides électriques qu'elle développe, on conçoit que dans un assemblage de corps conducteurs, tous les phénomènes électriques qui se développent en un point peuvent modifier de mille manières les affinités chimiques et les combinaisons qui doivent s'accomplir dans un autre point quelconque du système.

433. *De l'usage du multiplicateur pour découvrir l'électricité qui se développe dans les combinaisons et dans*

toutes les affinités moléculaires. — M. Avogrado est le premier, à ma connaissance, qui ait découvert, au moyen du multiplicateur, l'électricité qui se développe pendant les actions chimiques; ses expériences ont été répétées et développées par M. OErsted, et ensuite par un grand nombre de physiciens.

Lorsqu'on plonge les deux fils du multiplicateur dans un acide, ou en général dans un liquide capable d'exercer sur eux quelque action chimique, on observe dans l'aiguille une agitation qui révèle l'existence d'un courant électrique plus ou moins fort. Au premier instant, la direction du courant paraît fixe et déterminée; mais si l'expérience se prolonge un peu long-temps, on voit le pôle austral de l'aiguille se tourner tantôt à l'orient, tantôt à l'occident, et il serait difficile de reconnaître dans ces alternatives des périodes régulières. Plusieurs physiciens ont cru pouvoir assurer que la direction du courant devient constante dès qu'on établit quelque inégalité constante de température ou de surface entre les parties des fils qui plongent dans le liquide; mais, dans des expériences très-nombreuses, il m'a été impossible de reconnaître une fixité absolue dans cette loi; la circonstance qui me paraît la plus sûre et la plus décisive pour imprimer au courant une direction déterminée, est que l'un des fils soit maintenu en repos, tandis que l'autre est agité dans le liquide.

Pour étudier les effets des différens métaux, il suffit de les ajuster successivement aux deux extrémités des fils du multiplicateur, avec la précaution d'établir les contacts sensiblement de la même manière, et par des surfaces bien décapées; ainsi pour observer les effets de l'étain, on prend deux lames pareilles de ce métal, et on en attache une à chaque extrémité du multiplicateur. Dans tous les cas l'action chimique donne naissance à un courant, dont on peut facilement constater l'intensité; mais il reste souvent quelque incertitude sur sa direction.

Puisqu'il y a un courant dans le multiplicateur, il faut de toute nécessité qu'il ait son origine à l'un ou à l'autre des fils qui reçoivent l'action chimique; et puisque cette action est la même sur les deux, à l'intensité près, il est probable que ce que nous observons est seulement la différence des effets produits sur chacun d'eux. Mais cette différence est suffisante pour nous faire voir d'une manière non douteuse que les molécules ne peuvent pas se combiner sans produire ou sans absorber de l'électricité; c'est-à-dire que l'équilibre moléculaire ne peut être troublé sans que l'équilibre électrique ne le soit pareillement. Ce principe a été confirmé dans toute sa généralité par les recherches ingénieuses d'un grand nombre de physiciens, et surtout par celles de M. Becquerel et de M. Nobili.

434. *De l'électricité qui se développe dans les actions chimiques des gaz et des conducteurs imparfaits.* — Le multiplicateur est l'instrument le plus délicat pour accuser la présence de l'électricité dans les combinaisons des métaux et dans celles des liquides; mais pour les combinaisons d'une autre nature, il faut nécessairement avoir recours à d'autres appareils. Dans les recherches nombreuses que j'ai faites sur la combinaison des gaz, et sur celles des conducteurs imparfaits, j'ai toujours donné la préférence au condensateur qui est représenté dans la figure 87. MM. Lavoisier et Laplace, Volta, de Saussure et sir H. Davy avaient déjà employé le même moyen, mais à une époque où l'état de la science ne permettait pas de démêler avec certitude toutes les circonstances qui peuvent modifier les phénomènes électriques des combinaisons. Mes expériences avaient pour objet la recherche des principales causes qui peuvent donner naissance à l'électricité atmosphérique; ainsi je n'en donnerai le détail que dans les élémens de Météorologie; mais, pour me conformer à mon plan, il est nécessaire d'indiquer ici les conséquences auxquelles j'ai été conduit. Il résulte de mes expériences :

1°. Que les gaz dégagent de l'électricité lorsqu'ils se combinent, soit entre eux, soit avec les corps solides ou liquides.

2°. Que, dans ces combinaisons, l'oxigène dégage toujours l'électricité positive, et le corps combustible, quel qu'il soit, l'électricité négative.

3°. Que, réciproquement, quand une combinaison se défait, chacun des élémens, manquant alors de l'électricité qu'il avait dégagée, se trouve dans un état électrique opposé. Cette réciprocité montre en quoi l'état naissant diffère de l'état définitif d'un corps.

4°. Que l'action des végétaux sur l'oxigène de l'air est une des causes les plus permanentes et les plus puissantes de l'électricité atmosphérique; car si l'on considère, d'une part, qu'un gramme de charbon pur, en passant à l'état d'acide carbonique, dégage assez d'électricité pour charger une bouteille de Leyde, et, d'une autre part, que le charbon qui est engagé dans la constitution des végétaux ne donne pas moins d'électricité que le charbon qui brûle librement, on peut conclure, comme mes expériences directes tendent à l'établir, que sur une surface en végétation de 100 mètres carrés, il se produit en un jour plus d'électricité vitrée qu'il n'en faudrait pour charger la plus forte batterie électrique.

5°. Que le changement d'état des corps ne donne jamais la moindre trace d'électricité.

6°. Que les solutions faibles et concentrées des alcalis solides, tels que la strontiane, la chaux, la baryte, etc., donnent de l'électricité par la séparation chimique qui accompagne l'évaporation. La vapeur d'eau qui s'exhale prend l'électricité résineuse, et la solution restante, ou le dépôt d'alcali, prend l'électricité vitrée.

7°. Que les solutions faibles ou concentrées des gaz, des acides, ou des sels, donnent pareillement de l'électricité par la ségrégation chimique qui accompagne l'évapo-

ration ; mais pour ces corps, c'est, au contraire, la vapeur d'eau qui prend l'électricité vitrée, et la solution restante l'électricité résineuse.

8°. Que les eaux qui couvrent la surface de la terre, qui humectent le sol, ou qui imbibent les plantes, portant toujours en dissolution quelques substances étrangères qu'elles abandonnent par l'évaporation, toutes les vapeurs qu'elles produisent sont constituées dans un état électrique vitré ou résineux, à l'instant même où elles prennent naissance, et en s'élevant elles répandent et dispersent dans toute la masse atmosphérique les électricités dont elles sont chargées.

Si ces causes ne sont pas les seules qui agissent pour renouveler sans cesse l'électricité de l'atmosphère, elles sont du moins les causes les plus influentes, puisqu'elles sont par leur intensité en rapport avec la grandeur des phénomènes que l'on observe.

CHAPITRE VII.

Des Poissons électriques.

435. Il existe plusieurs poissons qui ont la propriété singulière de produire une vive secousse et un engourdissement profond dans la main qui les touche : la *torpille*, qui se trouve abondamment dans la mer Méditerranée, sur les côtes occidentales de France, et même sur les côtes d'Angleterre, est, sous ce rapport, l'un des poissons les plus énergiques de nos climats. Lorsqu'on veut la prendre avec la main, on reçoit un choc violent, sans qu'elle paraisse se donner aucun mouvement, et quelquefois le bras est frappé jusqu'à l'épaule d'une paralysie douloureuse qui dure plusieurs minutes, ou plutôt d'un frémissement pareil à celui qu'on éprouve quand on se frappe le coude. C'est ainsi du moins que s'expliquent les observateurs qui ont par eux-mêmes éprouvé ces effets, et ils ajoutent qu'après un premier choc on n'est pas tenté d'en recevoir immédiatement un second, quelque zèle que l'on ait pour la recherche de la vérité. Aussi la torpille est l'effroi des pêcheurs, et l'on juge aisément que, si elle a été pour eux l'objet d'une foule de traditions merveilleuses, elle a dû être aussi pour les naturalistes et pour les physiciens un sujet d'étude fort intéressant. Autrefois on expliquait les propriétés de la torpille en disant qu'elle était douée d'une propriété *torporifique* ; plus tard on a supposé qu'elle lançait des *molécules engourdissantes*; cependant Réaumur, dans un mémoire curieux sur ce sujet (*Acad. des Sciences*, 1714), essaie de réfuter cette explication et

de démontrer que l'organe de la torpille se débande comme un ressort et produit des effets pareils à ceux que l'on recevrait en touchant un corps sonore qui vibre violemment. A cette époque, la bouteille de Leyde n'était pas inventée; et dès que Muschenbroek en eut ressenti les effets, il eut l'heureuse idée de comparer la secousse que donne la torpille à une véritable commotion électrique, et de l'attribuer à la même cause. C'est alors que la torpille et les autres poissons analogues, que l'on appelait en général des *trembleurs*, furent appelés des *poissons électriques*. Maintenant on connaît avec certitude sept poissons électriques : *Torpedo narke risso*, *T. unimaculata*, *T. marmorata*, *T. Galvanii*, *Silurus electricus*, *Tetraodon electricus*, *Gymnotus electricus*. M. Geoffroy-Saint-Hilaire, qui a publié un travail important sur les poissons électriques (cinquième cahier des *Annales du Muséum d'histoire naturelle*), pense qu'ils appartiennent tous à des genres différens et qu'ils offrent chacun dans leur genre l'organisation la plus complète, sans blesser en rien l'ordre des rapports naturels. Nous nous bornerons ici à indiquer les principales propriétés de la torpille et du gymnote, qui sont, parmi les poissons électriques, ceux qui ont été l'objet du plus grand nombre de recherches.

436. *Propriétés de la torpille.* — C'est à Walsh que nous devons les premières recherches un peu précises sur les effets de la torpille; ses expériences furent faites à La Rochelle en 1772 et à l'île de Ré (*Journal de Physique*, t. IV, pag. 205); et il en tire les conséquences suivantes :

Quand la torpille est dans l'air, on reçoit la commotion en touchant directement une partie quelconque de sa peau, soit par un seul doigt, soit par toute la largeur de la main.

On reçoit pareillement les commotions lorsqu'on la touche avec un bon conducteur; par exemple, avec une tige de métal de plusieurs pieds de longueur.

La commotion est arrêtée par tous les mauvais conducteurs; ainsi, on peut toucher impunément la torpille avec du verre, de la résine, etc.

On peut même la toucher sans danger avec une petite bande d'étain collée sur du verre, pourvu qu'il se trouve dans l'étain une solution de continuité aussi petite qu'on puisse la faire avec la pointe d'un canif.

Quand plusieurs personnes *non isolées* se tiennent par la main, et que la première, seule, touche la torpille, la commotion se fait sentir à la seconde et même à la troisième, mais elle diminue d'intensité.

La commotion se fait sentir dans un cercle de vingt personnes non isolées qui se tiennent par la main, quand la première personne touche la torpille sous le ventre, tandis que la dernière la touche sur le dos, ou *vice versâ*.

Voilà les principaux résultats que l'on obtient dans l'air; la dernière expérience réussirait peut-être en touchant deux points quelconques qui ne soient pas opposés, comme Walsh semble l'exiger, sans doute à cause de l'analogie qu'il cherche à établir entre les bouteilles de Leyde et les torpilles. Dans l'eau, les commotions ont toujours moins d'intensité que dans l'air; mais elles se produisent encore de la même manière et sous les mêmes conditions. L'eau étant un assez bon conducteur, on conçoit qu'une torpille vive et énergique puisse agir à distance, et qu'alors il ne soit pas nécessaire de la toucher directement. Walsh a en effet observé qu'elle *foudroie* à distance de petits poissons, ou au moins qu'elle les étourdit ou les enivre.

Dans tous les cas, la commotion que lance la torpille est pour elle un phénomène volontaire; il arrive souvent qu'on la touche à plusieurs reprises sans rien obtenir; mais lorsqu'on l'irrite en lui pinçant les nageoires, ou de quelqu'autre manière, on est à peu près assuré de recevoir des coups redoublés; Walsh a compté jusqu'à cinquantes décharges en une minute. A chaque coup son corps reste parfaitement

immobile ; mais on observe dans ses yeux et dans les nageoires pectorales un mouvement particulier, et dans l'organe électrique lui-même une sorte de compression, qui sont des marques sûres qu'elle est au moment d'agir.

Il était curieux d'essayer les effets de la torpille sur le multiplicateur de Schweiger, afin de constater encore d'une manière plus certaine les rapports de ces phénomènes avec les décharges électriques. Au mois d'août 1828, M. de Blainville a fait à La Rochelle, avec M. Fleuriau de Bellevue, quelques expériences de cette nature, et l'aiguille a pirouetté de plus d'une demi-circonférence quand on a planté dans l'organe électrique les deux aiguilles qui terminaient les fils du multiplicateur.

437. *Propriétés du gymnote.* — Le gymnote électrique, que l'on appelle aussi l'*anguille de Surinam*, est doué d'une puissance électrique encore plus grande que celle de la torpille. Walsh fit venir de Surinam des gymnotes, sur lesquels il confirma les résultats qu'il avait obtenus de la torpille quelques années auparavant ; mais, de plus, il fit cette observation curieuse, que la commotion du gymnote peut se transmettre d'un conducteur à un autre au travers d'une petite lame d'air, et qu'alors on voit briller une étincelle électrique. (*Journ. de Phys.*, t. VIII, p. 305.)

M. de Humboldt a fait, en Amérique, avec M. Bonpland, un grand nombre d'expériences importantes sur le gymnote. Voici ce qu'il rapporte, dans son ouvrage, des habitudes de ce poisson singulier et des moyens de le pêcher.

« Nous partîmes, le 9 mars, de grand matin, pour le petit village de *Rastro de Abaxo* : de là, les Indiens nous conduisirent à un ruisseau qui, dans le temps des sécheresses, forme un bassin d'eau bourbeuse entouré de beaux arbres, de clusia, d'amyris et de mimoses à fleurs odoriférantes. La pêche des gymnotes avec des filets est très-difficile, à cause de l'extrême agilité de ces poissons, qui

s'enfoncent dans la vase comme des serpens. On ne voulut point employer le *barbasco*, c'est-à-dire les racines du *piscidia erithryna*, du *jacquinia armillaris* et de quelques espèces de *phyllanthus* qui, jetées dans une mare, enivrent ou engourdissent les animaux : ce moyen aurait affaibli les gymnotes. Les Indiens nous disaient qu'ils allaient *pêcher avec des chevaux*. Nous eûmes de la peine à nous faire une idée de cette pêche extraordinaire; mais bientôt nous vîmes nos guides revenir de la savane, où ils avaient fait une battue de chevaux et de mulets non domptés. Ils en amenèrent une trentaine qu'on força d'entrer dans la mare.

» Le bruit extraordinaire causé par le piétinement des chevaux, fait sortir les poissons de la vase et les excite au combat. Ces anguilles, jaunâtres et livides, semblables à de grands serpens aquatiques, nagent à la surface de l'eau, et se pressent sous le ventre des chevaux et des mulets. Une lutte entre des animaux d'une organisation si différente offre le spectacle le plus pittoresque. Les Indiens, munis de harpons et de roseaux longs et minces, ceignent étroitement la mare; quelques-uns d'entre eux montent sur les arbres, dont les branches s'étendent horizontalement au dessus de la surface de l'eau. Par leurs cris sauvages et la longueur de leurs joncs, ils empêchent les chevaux de se sauver, en atteignant la rive du bassin. Les anguilles, étourdies du bruit, se défendent par la décharge réitérée de leurs batteries électriques. Pendant long-temps elles ont l'air de remporter la victoire. Plusieurs chevaux succombent à la violence des coups invisibles qu'ils reçoivent de toute part dans les organes les plus essentiels à la vie; étourdis par la force et la fréquence des commotions, ils disparaissent sous l'eau. D'autres, haletant, la crinière herissée, les yeux hagards, et exprimant l'angoisse, se relèvent et cherchent à fuir l'orage qui les surprend. Ils sont repoussés par les Indiens au milieu de l'eau : cependant un petit nombre parvient à tromper l'active vigilance des pê-

cheurs. On les voit gagner la rive, broncher à chaque pas, s'étendre dans le sable excédés de fatigue et les membres engourdis par les commotions électriques des gymnotes.

» En moins de cinq minutes, deux chevaux étaient noyés. L'anguille, ayant cinq pieds de long et se pressant contre le ventre des chevaux, fait une décharge de toute l'étendue de son organe électrique. elle attaque à la fois le cœur, les viscères et le *plexus cœliacus* des nerfs abdominaux. Il est naturel que l'effet qu'éprouvent les chevaux soit plus puissant que celui que le même poisson produit sur l'homme lorsqu'il ne le touche que par une des extrémités. Les chevaux ne sont probablement pas tués, mais simplement étourdis. Ils se noient, étant dans l'impossibilité de se relever, par la lutte prolongée entre les autres chevaux et les gymnotes.

» Nous ne doutions pas que la pêche ne se terminât par la mort successive des animaux qu'on y emploie; mais peu à peu l'impétuosité de ce combat inégal diminue; les gymnotes, fatigués, se dispersent. Ils ont besoin d'un long repos et d'une nourriture abondante pour réparer ce qu'ils ont perdu de force galvanique. Les mulets et les chevaux parurent moins effrayés; ils ne hérissaient plus la crinière; leurs yeux exprimaient moins d'épouvante. Les gymnotes s'approchaient timidement du bord des marais, où on les prit au moyen de petits harpons attachés à de longues cordes. Lorsque les cordes sont bien sèches, les Indiens, en soulevant le poisson dans l'air, ne ressentent peint de commotions. En peu de minutes nous eûmes cinq grandes anguilles, dont la plupart n'étaient que légèrement blessées. D'autres furent prises vers le soir par le même moyen.

» La température des eaux dans lesquelles vivent habituellement les gymnotes est de 26° à 27°. On assure que leur force électrique diminue dans les eaux plus froides; et il est assez remarquable, en général, comme l'a déjà observé un physicien célèbre, que les animaux doués d'or-

ganes électromoteurs, dont les effets deviennent sensibles à l'homme, ne se rencontrent pas dans l'air, mais dans un fluide conducteur de l'électricité. Le gymnote est le plus grand des poissons électriques; j'en ai mesuré qui avaient cinq pieds à cinq pieds trois pouces de long. Les Indiens assuraient qu'ils en avaient vu de plus grands encore. Nous avons trouvé qu'un poisson qui avait trois pieds dix pouces de long pesait douze livres. Le diamètre transversal du corps était (sans compter la nageoire anale, qui est prolongée en forme de carène) de trois pouces cinq lignes. Les gymnotes du *Cano* de Bera sont d'un beau vert d'olive. Le dessous de la tête est jaune, mêlé de rouge. Deux rangées de petites taches jaunes sont placées symétriquement le long du dos, depuis la tête jusqu'au bout de la queue. Chaque tache renferme une ouverture excrétoire : aussi la peau de l'animal est constamment couverte d'une matière muqueuse, qui, comme Volta l'a prouvé, conduit l'électricité vingt à trente fois mieux que l'eau pure. Il est, en général, assez remarquable qu'aucun des poissons électriques découverts jusqu'ici dans les différentes parties du monde ne soit couvert d'écailles. »

En opérant sur ces poissons, dont les batteries sont si puissantes, M. de Humboldt n'a pu découvrir aucune action directe sur les électromètres les plus sensibles, et aucun phénomène de lumière électrique.

438. *De l'organe électrique.* — Dans les divers poissons électriques, l'organe qui développe l'électricité a sensiblement la même texture et les mêmes apparences, quoique différent par sa forme, par sa grandeur et par sa disposition. Nous essaierons seulement de donner une idée de l'organe de la torpille, qui a été l'objet des recherches les plus précises. Cet organe se divise en deux parties symétriquement placées de chaque côté de la tête et appuyées contre les branchies; elles occupent l'une et l'autre toute l'épaisseur qui sépare les deux plis de la peau. Lorsqu'on

en fait la dissection, on voit qu'il est composé d'un tissu cellulaire extrêmement lâche, à grandes mailles, qui affecte la forme d'un cylindre ou plutôt d'un prisme à cinq à six pans. On en fait une comparaison sensiblement exacte, en disant qu'il ressemble aux alvéoles d'un rayon de miel, seulement les cloisons ne sont pas de minces membranes, mais plutôt des fibres, séparées et tendues dans des sens différens.

On compte ordinairement dans chaque organe quatre à cinq cents de ces petits prismes, et il paraît que Hunter en a compté une fois jusqu'à onze cent quatre-vingt-deux. Ils sont à peu près perpendiculaires à la direction de la peau, à laquelle ils sont fortement adhérens par leurs deux extrémités. Si l'on observe en détail la structure de chacun de ces prismes, on y distingue une foule de lames minces perpendiculaires aux arêtes, séparées l'une de l'autre et ajustées enfin comme les divers élémens d'une pile. Ces petits feuillets distincts, tantôt plans, tantôt ondulés, sont séparés par des couches muqueuses très-adhérentes; mais en pressant un organe on ne peut faire sortir aucune quantité sensible de fluide.

Quatre faisceaux nerveux d'un grand volume viennent se distribuer dans l'organe; le premier venant de la cinquième paire, et les trois autres de la huitième; en outre, on observe un appareil qui suppose une très-active circulation.

Cette organisation a certainement des rapports frappans avec les piles de Volta; mais il faudrait des observations anatomiques plus précises, des expériences physiques et physiologiques plus nombreuses, pour porter jusqu'à l'évidence ces analogies qui se présentent d'une manière si séduisante.

FIN DE LA DEUXIÈME PARTIE
DU TOME PREMIER.

ERRATA DU PREMIER VOLUME.

DEUXIÈME PARTIE.

Page 5, lig. 21, tamis par des chocs, *lisez* tamis. Par des chocs.
6, 19, nos sommes, *lisez* nous sommes.
7, 3, des noms, *lisez* de noms.
8, 18, matièree, *lisez* matière.
18, 28, (292), *lisez* (291).
27, 22, et de la peser, *lisez* et à la peser.
30, 26, en *a* et b_1, *lisez* en *a* et *b*.
31, 28, dont l'en, *lisez* dont l'un.
32, 16, l'angle vertical, *lisez* l'angle du vertical.
Ib., 22, qu'éprouvent, *lisez* qu'éprouve.
36, 10, Nassau, *lisez* de Nassau.
39, 3 *de la note*, est en CA, *lisez* est en C.
44, 10, on le nomme, *lisez* on les nomme.
Ib., 12, ils se composent, *lisez* ils composent.
Ib., 25, a durée, *lisez* la durée.
45, 13, en gérnéral, *lisez* en général.
47, 15, *cc*, lisez *cc'*.
51, 10, foire osciller, *lisez* faire osciller.
68, 16, $\frac{N''2 - N2}{N}$, *lisez* $\frac{N''2 - N2}{N2}$
70, 19, quelconque, *ajoutez* passant par le fil.
71, 19, 15_0, *lisez* 15°.
72, 5, un fin de cocons, *lisez* un fil de cocon.
74, 10, magétisme, *lisez* magnétisme.
75, 1, *a* et *b*, lisez *a'* et *b'*.
83, 32, ou en 40", *supprimez* ou.
87, 28, corps interne, *lisez* corps inerte.
91, 22, leurs boîtes, *lisez* des boîtes.
92, 8, *cc'*, lisez CC'.
93, 29, un aimait, *lisez* un aimant.
96, 16, *p*, lisez P.
110, 11, remarquabble, *lisez* remarquable.
114, 2, conductibilé, *lisez* conductibilité.
114, 29, commuinique, *lisez* communique.
116, 3, il n'en résulte, *lisez* il ne résulte.
119, 27, électricité, *lisez* électrisé.
120, 2, *cc'*, lisez *cc*.
Ib., 6, mélal, *lisez* métal.
126, 1, (365 et 366), *lisez* (335 et 336).
127, 9, Volta, *lisez* Wilck.
133, 20, la perte de l'air, *lisez* la perte par l'air.
134, 14, a lieu, *lisez* a eu lieu.
138, 7, au dessus, *lisez* au dessous.
145, 28, épouvent, *lisez* éprouvent.
154, 26, avec l'intérieur, *lisez* avec l'extérieur.
173, 12, (350), *lisez* (373).
176, 8, principes, *lisez* principes.
198, 21, ne pourront pas, *lisez* pourront ne pas.

TABLE

DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LA DEUXIÈME PARTIE DU PREMIER VOLUME.

LIVRE TROISIÈME.

DU MAGNÉTISME.

CHAPITRE I. — De l'Action des Aimans sur eux-mêmes et sur les substances magnétiques. 1
CHAP. II. — De l'Action magnétique de la Terre. 20
CHAP. III. — Des Lois et de la Théorie du Magnétisme. . . 65
CHAP. IV. — Des Procédés d'aimantation, et des Causes qui modifient la Force coercitive. 81
CHAP. V. — Du Magnétisme en mouvement, et de quelques Phénomènes singuliers d'attraction et de répulsion. . . . 95

LIVRE QUATRIÈME.

DE L'ÉLECTRICITÉ.

CHAP. I. — Des Actions électriques. 104
CHAP. II. — De l'Électricité par influence. 118
CHAP. III. — Des Forces électriques. 130
CHAP. IV. — De l'Électricité dissimulée. 147
CHAP. V. — De la Lumière électrique. 164
CHAP. VI. — Du Mouvement des corps électrisés. 171
CHAP. VII. — Des diverses Causes qui développent de l'électricité. 176

CHAP. VIII. — *Électricité galvanique.* — De l'électricité développée au contact 183
CHAP. IX. — De la Pile de Volta. 193
CHAP. X. — Des Piles sèches. 227

LIVRE CINQUIÈME.

DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

CHAP. I. — De l'Action des Courans sur les Aimans. 236
CHAP. II. — De l'Action de la Terre et des Aimans sur les Courans 274
CHAP. III. — De l'Action des Courans sur les Courans. . . . 290
CHAP. IV. — Phénomènes thermo-électriques 308
CHAP. V. — De la Conductibilité. 313
CHAP. VI. — Des phénomènes électro-chimiques. 326
CHAP. VII. — Des Poissons électriques. 335

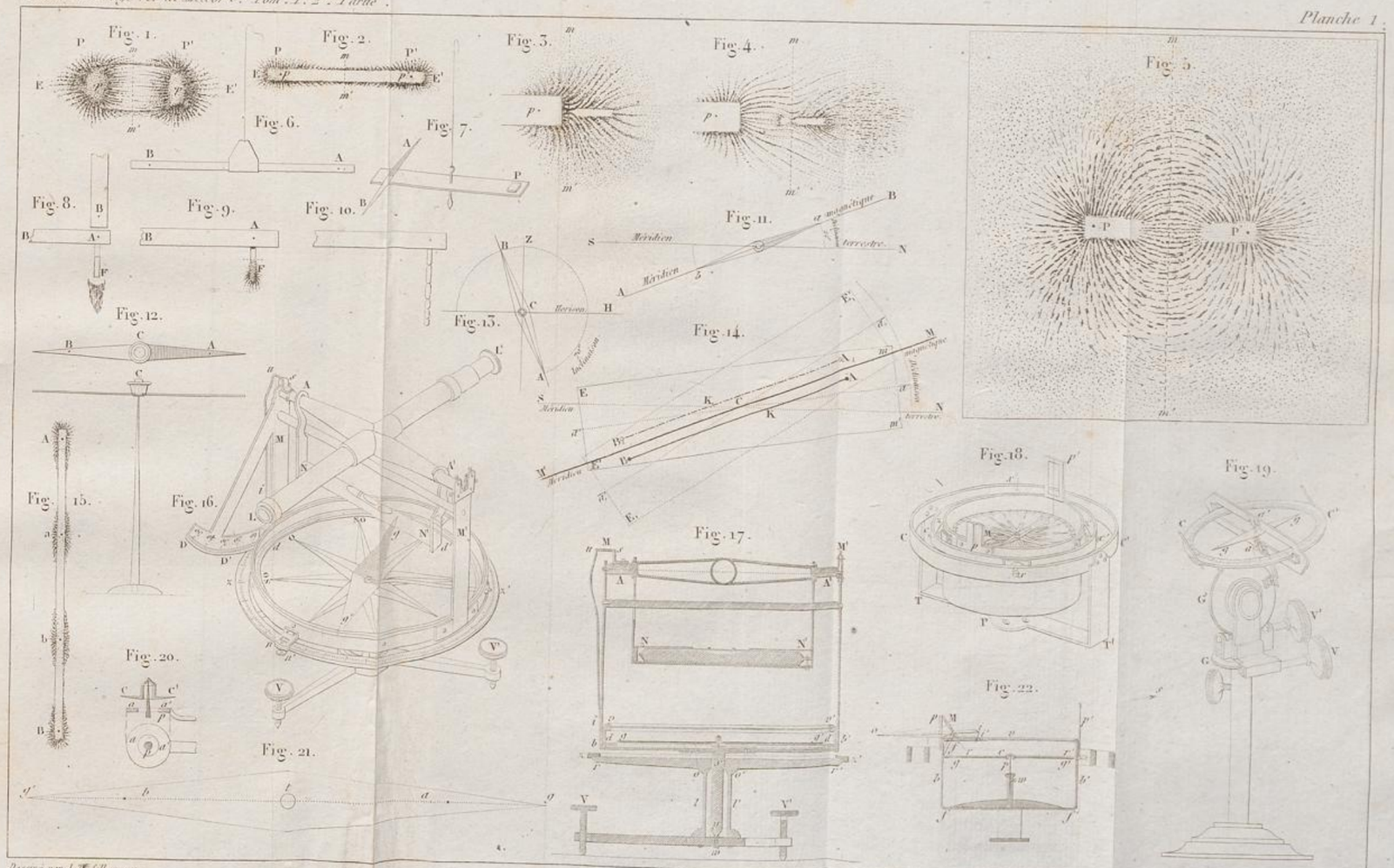
FIN DE LA TABLE DE LA DEUXIÈME PARTIE DU PREMIER VOLUME.

CHAP. VIII. — Électricité galvanique. — De l'électricité développée au contact 183
CHAP. IX. — De la Pile de Volta. 193
CHAP. X. — Des Piles sèches. 227

LIVRE CINQUIÈME.

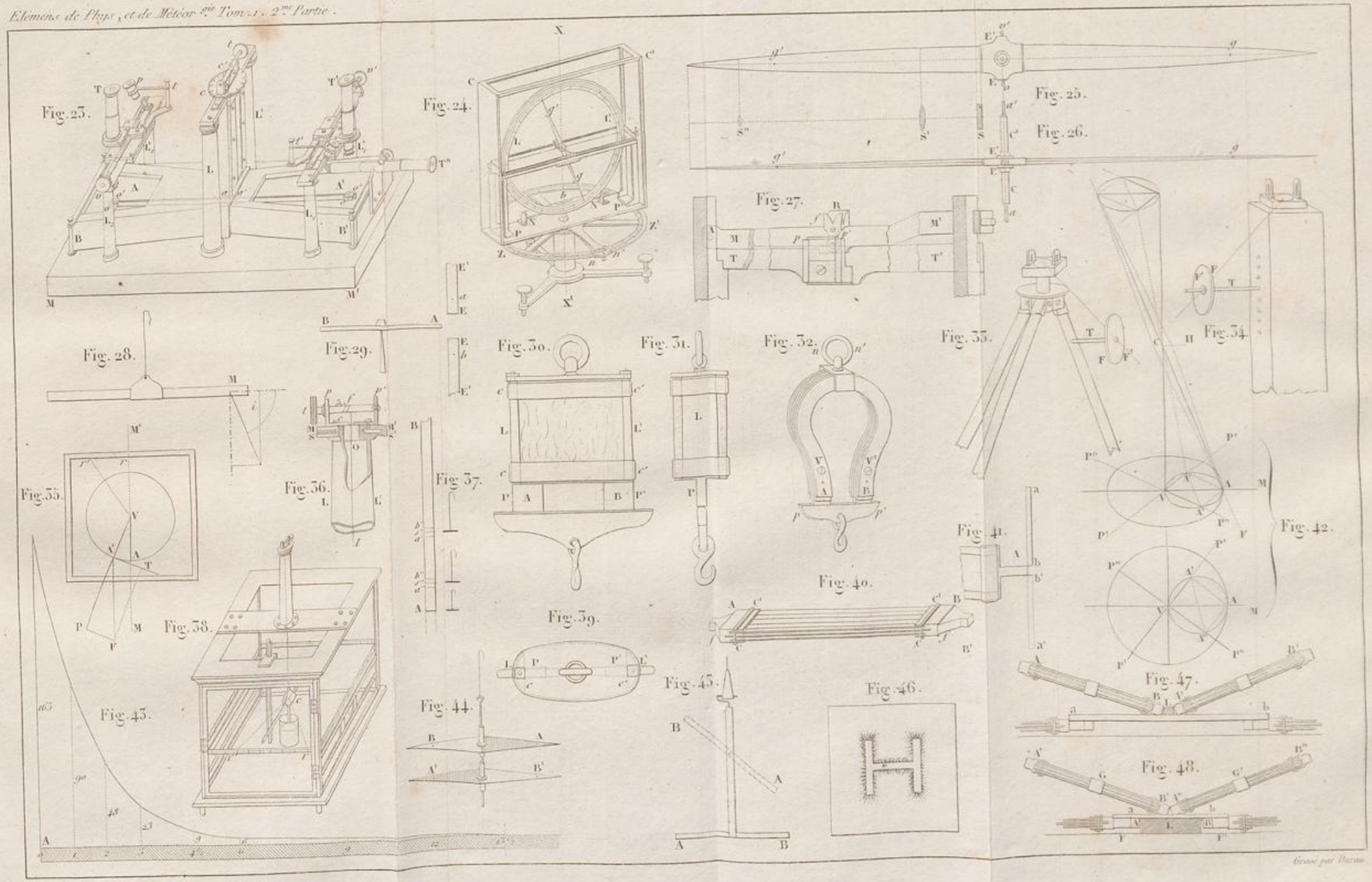
DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

CHAP. I. — De l'Action des Courans sur les Aimans. 236
CHAP. II. — De l'Action de la Terre et des Aimans sur les Courans 274
CHAP. III. — De l'Action des Courans sur les Courans. . . . 290
CHAP. IV. — Phénomènes thermo-électriques. 308
CHAP. V. — De la Conductibilité. 3
CHAP. VI. — Des phénomènes électro-chimiques. 326
CHAP. VII. — Des Poissons électriques. 335



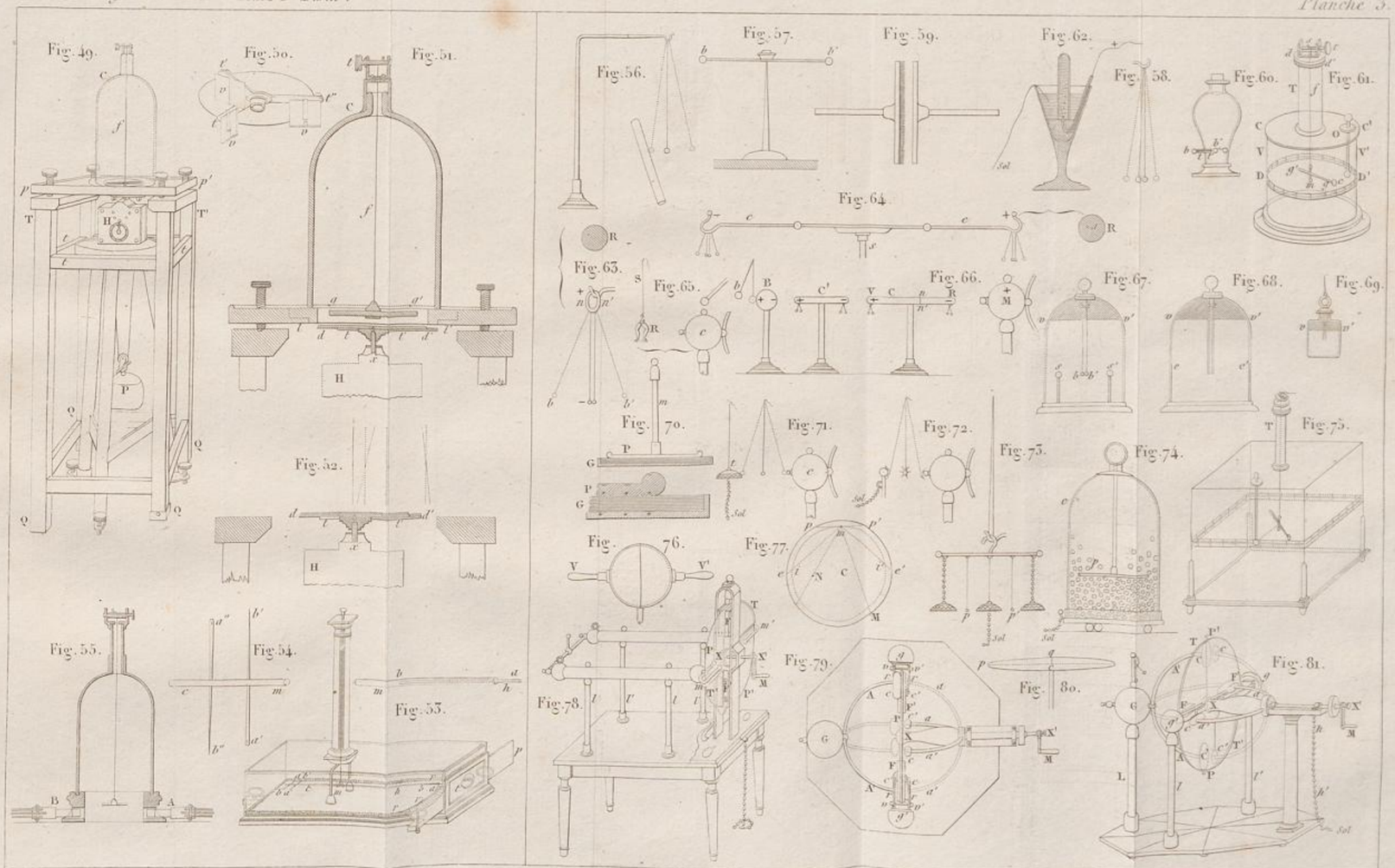
Dessiné par J. T. Silbermann

Gravé par Duran



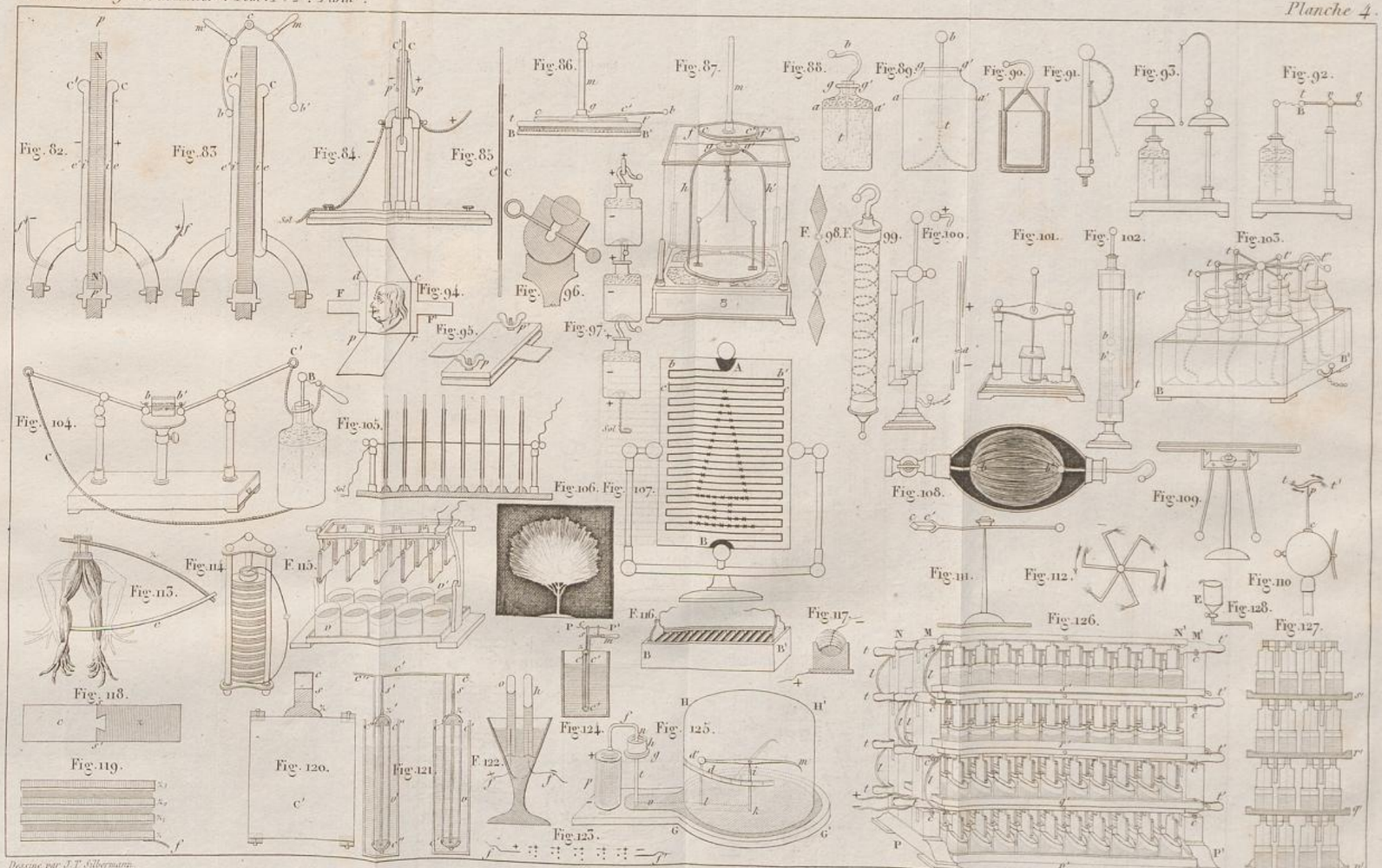
Dessiné par J.T. Silbermann.

Gravé par Durau.



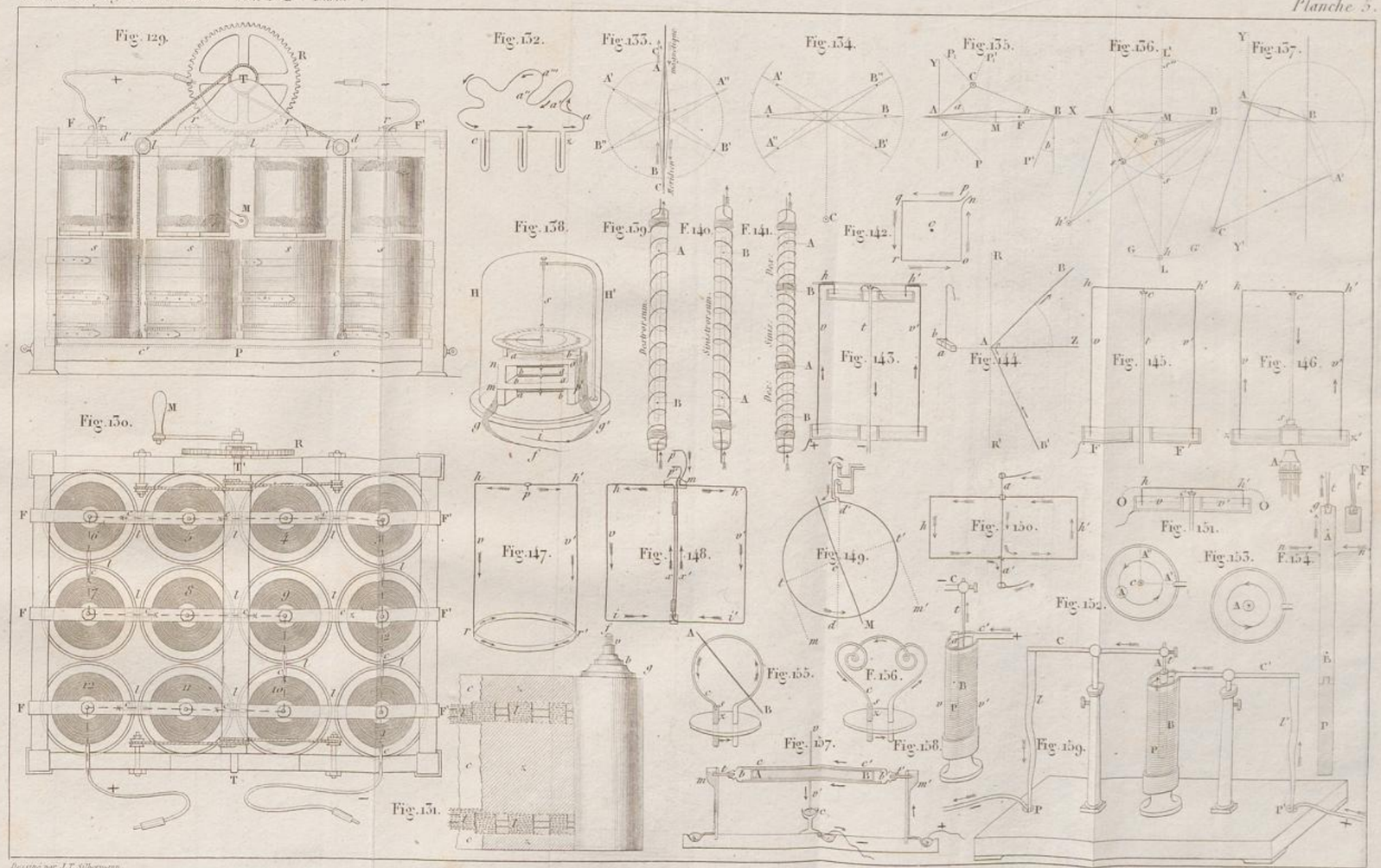
Dessiné par J. T. Silbermann.

Gravé par Duran.



Dessiné par J.T. Silbermann.

Gravé par Duvau.



Dessiné par J.T. Silbermann.

Gravé par Dien.

Fig. 160.

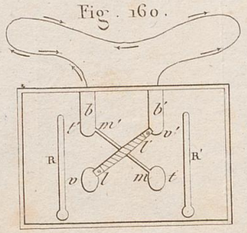


Fig. 161.

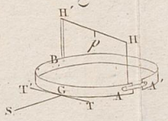


Fig. 162.

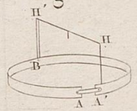


Fig. 163.



Fig. 164.

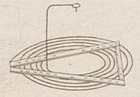


Fig. 165.

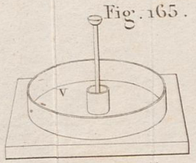


Fig. 166.

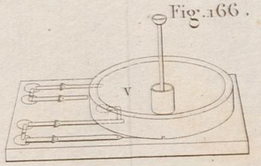


Fig. 160. (bis)

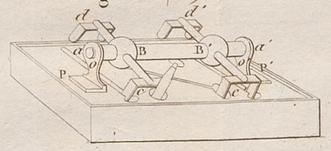


Fig. 168.

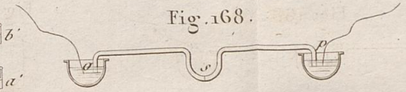


Fig. 178.

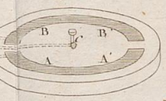


Fig. 175.

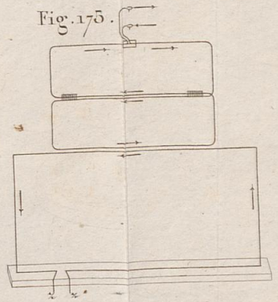


Fig. 176.

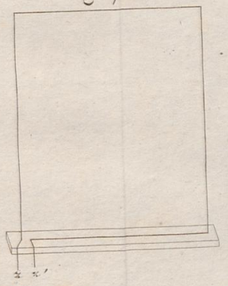


Fig. 174.



Fig. 170.

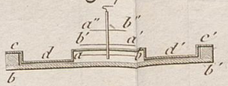


Fig. 171.

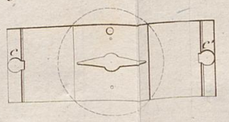


Fig. 177.

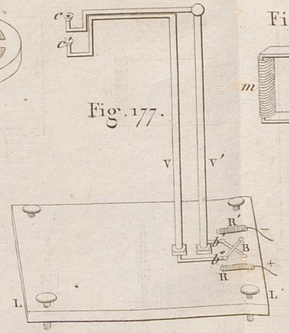


Fig. 167.

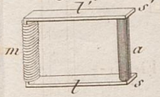


Fig. 169.

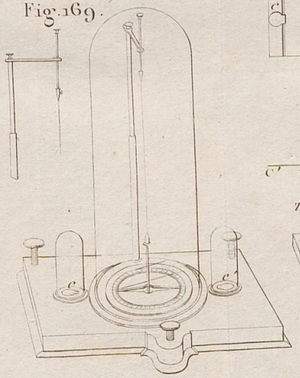


Fig. 175. (bis)

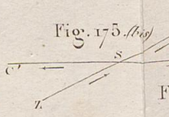


Fig. 179.

Fig. 175. (ter)

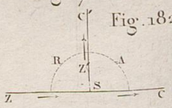


Fig. 182.

Fig. 172.

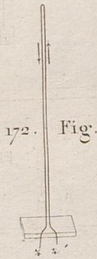


Fig. 173.

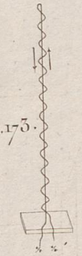
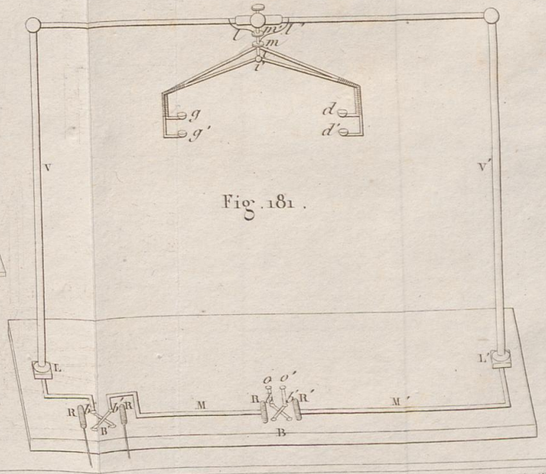


Fig. 181.



Gravé par Le Blanc.

ETH Zürich
Bibliothek

Abt.	T	Nummer	U	Band	Teil	Aufl.	E	S	
7		78136		1	2 (*				

BUCHKARTE
Bitte nicht herausnehmen!
12/72
34256

7813C:2/1 Rar 24601:2/1

W. Ebenschmid. Stud. Med.
Mard. 35.

Louis Rollier
Professeur
St. Imier 1886

BIBLIOTHEK D. EIDG. TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

ÉLÉMENS
DE PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE
ET
DE MÉTÉOROLOGIE.

TOME II.

PREMIÈRE PARTIE.

ETH-BIBLIOTHEK ZÜRICH
78 136 : 2/1

PARIS. — IMPRIMERIE DE COSSON
Rue Saint Germain-des-Prés, n° 9

ÉLÉMENS
DE
PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE
ET DE
MÉTÉOROLOGIE,

PAR M. POUILLET,

Professeur de Physique à la Faculté des Sciences et à l'École Polytechnique; Membre de la Société philomatique, du Conseil de la Société d'Encouragement, etc.

OUVRAGE ADOPTÉ PAR LE CONSEIL ROYAL DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE POUR L'ENSEIGNEMENT DANS LES ÉTABLISSEMENS DE L'UNIVERSITÉ.

SECONDE ÉDITION, REVUE, CORRIGÉE ET AUGMENTÉE.

Verus experientiæ ordo primo lumen accendit, deinde per lumen iter demonstrat.

BACON, *Nov. Org.*



TOME DEUXIÈME.

PREMIÈRE PARTIE.

A PARIS,

CHEZ BÉCHET JEUNE,

LIBRAIRE DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE,

PLACE DE L'ÉCOLE DE MÉDECINE, N° 4.

1832.

ÉLÉMENS
DE PHYSIQUE
EXPÉRIMENTALE
ET
DE MÉTÉOROLOGIE.

LIVRE SIXIÈME.

DES ACTIONS MOLÉCULAIRES.

439. Un corps organique ou inorganique peut être considéré comme un système en équilibre; ses parties constituantes ou ses molécules les plus rapprochées restent séparées par des intervalles plus ou moins grands, et cependant à ces distances elles agissent sans cesse les unes sur les autres, pour se maintenir dans leurs positions respectives, pour s'attirer ou se repousser, ou enfin pour se communiquer les efforts et les pressions qu'elles supportent. Ce sont ces actions mutuelles des molécules, que l'on appelle en physique, *actions moléculaires*. Il serait difficile d'établir une distinction entre ces forces et les *forces chimiques*, qui agissent pareillement, aux mêmes distances, sur toutes les molécules de la matière; mais on peut dire que les actions chi-

miques tendent à produire les corps et à les constituer dans un état déterminé d'équilibre ou d'agrégation, tandis que les actions moléculaires proprement dites tendent à conserver les corps, ou à les retenir dans l'état d'équilibre ou d'agrégation qu'ils ont reçu. Considérées sous ce point de vue, les actions moléculaires comprennent encore un champ assez vaste pour qu'il soit nécessaire d'y établir quelques divisions. Ainsi nous étudierons, dans des chapitres séparés, *la capillarité*, *la structure des corps* et *l'élasticité*.

CHAPITRE PREMIER.

Capillarité.

440. Lorsqu'on fait tremper dans un liquide, l'extrémité inférieure d'un tube de verre (*Fig.* 1 et 2), on remarque que la colonne liquide qui pénètre dans ce tube, ne s'arrête presque jamais au niveau extérieur. Dans certains liquides, dans l'eau, par exemple, elle s'élève au-dessus (*Fig.* 1), et dans le mercure, au contraire, elle s'abaisse au-dessous (*Fig.* 2). Ces phénomènes singuliers d'*ascension* ou de *dépression*, doivent être désignés par un nom spécial, parce qu'ils semblent échapper aux lois générales de l'équilibre des fluides, et dès leur découverte ils furent appelés *phénomènes capillaires*, parce qu'on les observa d'abord dans des tubes étroits dont les diamètres intérieurs étaient sans doute comparés à l'épaisseur d'un cheveu, ou peut-être même au diamètre du petit canal régulier et constant que présentent les cheveux dans le sens de leur longueur. La force ou la cause qui produit ces phénomènes, a été appelée tantôt *action capillaire*, tantôt *attraction capillaire*; mais aujourd'hui on s'accorde à l'appeler simplement *capillarité*.

Cette force n'agit pas seulement pour élever ou déprimer les petites colonnes liquides dans l'intérieur des tubes, nous verrons qu'elle s'exerce sans cesse au contact des liquides avec les solides, au contact des liquides entre eux ou des solides entre eux, et en général au contact de toutes les parcelles les plus ténues de la matière pondérable.

441. *Les longueurs des colonnes soulevées ou déprimées dans les tubes sont en raison inverse de leurs diamètres.*

Il est facile de reconnaître par l'expérience qu'en géné-

ral les différences de niveau sont d'autant plus grandes que les diamètres des tubes sont plus fins. On voit, par exemple (*Fig.* 3), quatre tubes en syphon, dont les deux premiers contiennent de l'eau, leurs larges branches B et B′ sont égales, mais leurs branches étroites *b* et *b*′, sont l'une de 1 millimètre, et l'autre de 1/2 millimètre environ, et dans celui-ci l'élévation est à peu près double; il en est de même pour le 3e et le 4e tube, qui contiennent du mercure, et dont les branches étroites ont pareillement, l'une 1 millimètre, et l'autre 1/2 millimètre de diamètre. Celui-ci offre une dépression presque double. Cependant, pour établir cette loi fondamentale sur des expériences précises, il faut avoir recours à d'autres appareils et à d'autres moyens d'observation. C'est M. Gay-Lussac qui nous servira de guide dans cette recherche, car on peut dire qu'avant lui les observateurs les plus habiles n'avaient obtenu que des résultats tout-à-fait discordans, lorsqu'ils avaient voulu déterminer les différences absolues de niveau des divers liquides dans des tubes de dimensions connues.

Remarquons d'abord que toutes les fois qu'il y a *ascension* dans un tube capillaire assez étroit, le sommet de la colonne liquide prend et conserve une forme particulière qui est représentée et fort amplifiée dans la figure 12; c'est *exactement* une demi-sphère creuse dont le diamètre est le diamètre du tube lui-même; on l'appelle un *menisque concave*. Au contraire quand il y a *dépression*, le sommet de la colonne liquide prend et conserve la forme d'une demi-sphère pleine, dont le diamètre est encore le diamètre du tube (*Fig.* 13); on l'appelle un *menisque convexe*. Ces formes sont essentiellement liées à l'ascension et à la dépression, car si l'on enduit de quelques corps gras, la surface intérieure d'un tube de verre, et qu'on en plonge l'extrémité dans de l'eau colorée, on observe que non-seulement l'eau cesse de s'élever au-dessus du niveau, mais qu'elle reste *déprimée* dans ce tube enduit de graisse, et

qu'en même temps le sommet de la colonne prend la forme du *menisque convexe*, comme fait le mercure dans les tubes ordinaires. Il résulte de cette observation que *les différences de niveau dépendent de la forme du menisque*, et qu'ainsi toutes les causes accidentelles qui pourraient empêcher celui-ci de prendre la forme exacte qu'il doit avoir, empêcheraient aussi, par cela même, le liquide de parvenir à la hauteur précise à laquelle il doit trouver la stabilité de son équilibre. En effet, lorsqu'on plonge dans l'eau un tube dont la surface intérieure semble même très-nette, on observe presque toujours des *dentelures* plus ou moins marquées sur les bords du menisque, et si l'on répète l'expérience à diverses époques, avec de l'eau pure, en mesurant à chaque fois la hauteur à laquelle s'élève la colonne, on trouve des nombres fort discordans, qui diffèrent souvent du simple au double.

Avec de telles irrégularités aucune comparaison n'est possible, et aucune loi ne peut être établie sur des bases certaines. Pour remédier à cet inconvénient, il faut avant tout, faire passer dans le tube des acides ou de l'alcool, suivant la nature des impuretés dont il peut être souillé, puis le laver soigneusement, et enfin le *mouiller* dans toute sa longueur, avec le liquide sur lequel on veut faire des expériences, si ce liquide est en effet de nature à le mouiller. C'est par ces précautions minutieuses, et par beaucoup d'autres encore, que M. Gay-Lussac est parvenu à des résultats comparables. Quant au diamètre des tubes, on le détermine par le poids du mercure qu'ils peuvent contenir, ou seulement par le poids d'une colonne de mercure qui occupe sur leur longueur un espace déterminé.

Voici maintenant l'appareil de M. Gay-Lussac. P P, (*Fig.* 26) est une large éprouvette fixée sur un pied à vis calantes, afin que son bord supérieur H H′ puisse être rendu horizontal. Le liquide qu'elle contient s'élève jusqu'en N N′; le tube capillaire T S M est monté sur une plaque Q Q′ qui

se pose sur le bord de l'éprouvette; au moyen d'une coulisse verticale c, le tube peut monter ou descendre. A côté de l'éprouvette, à quelques pouces de distance, est une règle verticale R, sur laquelle se meut une lunette L, d'abord à frottement, et ensuite au moyen d'une vis de rappel pour les petits mouvemens. Pour mesurer la hauteur S M de la colonne, on fait d'abord mouvoir la lunette jusqu'à ce que son fil micrométrique horizontal semble raser le sommet s; ensuite, écartant la plaque Q Q′ vers les bords de l'éprouvette, on place à côté d'elle la pièce A A′, et après l'avoir ajustée, on tourne la tige à vis G jusqu'à l'instant où elle effleure la surface M du liquide; ensuite on enlève un peu de liquide avec une pipette ou autrement, et notant le point de départ de la lunette, on la fait descendre peu à peu, jusqu'à ce que la pointe de la tige tombe sous le fil; l'étendue de sa course est la hauteur du liquide au-dessus du niveau.

Le tableau suivant contient la moyenne des résultats auxquels M. Gay-Lussac a été conduit.

Nom des substances.	Densité.	Température en degrés centigrades.	Élévation dans un tube dont le diam. = 1mm,2944.	Élévation dans un tube dont le diam. = 1mm,9038.	Élévation dans un tube dont le diam. = 10mm,508.
Eau.	1	8°,5	23mm,1634 élévat.	15,5861 élévat.	»
Alcool.	0,8196	8°	9,1823 *id.*	6,4012 *id.*	»
Id.	0,8595	10°	9,301 *id.*	»	»
Id.	0,9415	8°	9,997 *id.*	»	»
Id.	0,8135	16°	7,078 *id.*	»	0,3835
Essence de térébenthine.	0,8695	8°	9,8516 *id.*	»	

Les diverses densités sont prises aux températures indiquées dans la troisième colonne, et elles sont exprimées en prenant pour unité la densité de l'eau à la même température.

Le rapport inverse des diamètres des deux premiers tubes, est 1,474, et le rapport des hauteurs correspondantes, est de 1,486 pour l'eau, et 1,434 pour l'alcool. Ainsi, l'on peut bien admettre comme loi expérimentale que les hauteurs des colonnes soulevées sont en raison inverse des diamètres des tubes. En calculant d'après ces données, les hauteurs des colonnes d'eau, d'alcool et d'essence de térébenthine qui devraient s'élever dans un tube de 1 millimètre, on trouve les nombres suivans.

Noms des substances.	Densité.	Températ.	Élévation dans un tube dont le diam. = 1mm.
Eau.	1	8°,5	29mm,79
Alcool.	0,8196	8°	12,18
Id.	0,8135	16°	9,15
Id.	0,8595	10°	12,01
Id.	0,9415	8°	12,91
Essence de térébenthine.	0,8695	8°	12,72

Cependant nous devons regretter que les autres résultats de M. Gay-Lussac ne soient pas publiés, et avec d'autant plus de raison qu'il est impossible maintenant d'employer avec confiance les nombres que les autres observateurs nous ont laissés. Il résulte, par exemple, des expériences de MM. Haüy et Trémery que, dans un tube de 1 millimètre de diamètre, l'eau doit s'élever seulement de 13mm,57. Newton avait trouvé à peu près le même résultat, tandis que d'autres physiciens se rapprochent plus ou moins du nombre 29,79 trouvé par M. Gay-Lussac,

On pourrait peut-être supposer que ces discordances tiennent à quelque différence fondamentale, soit dans l'épaisseur des tubes, soit dans la nature de leur substance. Mais Boyle Hauksbee et plusieurs autres encore ont démontré, par des expériences directes, qu'à diamètre égal les tubes dont les parois sont les plus minces et les plus fragiles, déterminent exactement les mêmes ascensions et les mêmes dépressions que les tubes très-épais. Il y a plus, toutes les théories de la capillarité s'accordent à supposer que la nature de la substance n'a aucune part dans les phénomènes, pourvu que le liquide puisse *mouiller* les parois, et qu'ainsi des tubes de fer et des brins d'herbes bien humectés, produiraient les mêmes effets que des tubes de verre de même diamètre.

Nous avons noté avec soin les températures et les densités, parce qu'il paraît que pour un même liquide les différences de niveau sont en raison directe des densités.

Nous donnerons dans la météorologie les tables de la dépression du mercure dans les tubes de différens diamètres.

442. *Hauteurs différentes auxquelles peut s'arrêter le même liquide dans le même tube.* Lorsqu'un tube a servi à une expérience, si on le retire du liquide avec précaution, et qu'on observe la hauteur de la colonne qui reste suspendue dans son intérieur, on reconnaît qu'elle est toujours plus grande qu'elle n'était d'abord : par exemple, A S (*Fig.* 6) étant la colonne soulevée au-dessus du niveau pendant que le tube est plongé, la colonne suspendue lorsqu'il sera hors du liquide, pourra être A' S (*Fig.* 5), ou même A'' S'' (*Fig.* 4). Cette différence dépend de la goutte qui reste à l'extrémité inférieure du tube, et qui forme un menisque plus ou moins convexe. En effet, pour des parois très-épaisses, sur lesquelles la goutte s'élargit beaucoup, cet excès d'élévation est toujours moindre ; au contraire dans les tubes à parois très-minces le menisque convexe de la goutte étant à peu près égal au menisque

concave du sommet de la colonne, on observe un excès d'élévation presque égal à l'élévation elle-même, c'est-à-dire que A″ s″ (*Fig.* 4) est double de A s (*Fig.* 6). On peut, avec quelques précautions, obtenir le même résultat avec des tubes à fortes parois; il suffit pour cela de dessécher leur extrémité inférieure pour circonscrire la goutte et l'empêcher de s'étaler sur toute la largeur.

Les tubes recourbés en *syphon* présentent des phénomènes analogues, et même ils ont l'avantage d'être plus commodes pour ces expériences. Dans le syphon s s′ (*Fig.* 7), dont le diamètre est uniforme, les sommets s et s′ des deux colonnes sont à la même hauteur, tant que le liquide n'atteint pas l'extrémité de la courte branche; mais dès qu'il y touche on peut faire couler du liquide dans la longue branche et y produire ainsi un excès de hauteur toujours croissant. A mesure que le niveau s'y élève, le menisque de la courte branche perd peu à peu sa forme, sa concavité diminue, et tend à se changer en surface plane, et si l'on observe le phénomène avec attention, il est facile de reconnaître qu'à l'instant où il atteint cette limite, la différence de niveau $a\,h$ est précisément la hauteur à laquelle s'élève le liquide dans un tube droit de même diamètre que le syphon; cependant on peut continuer de verser du liquide dans la longue branche; alors la surface plane qui limite la colonne à l'extrémité de la courte branche devient de plus en plus convexe, et le niveau peut ainsi monter jusqu'à une hauteur $a'\,h$ double de $a\,h$; à cet instant le menisque forme une demi-sphère, et si l'on verse encore du liquide dans l'autre branche sa convexité crève, et la colonne retombe plus ou moins suivant l'étendue sur laquelle peut s'étaler la goutte qui en résulte.

Ces phénomènes peuvent être produits en sens inverse, en mettant d'abord dans la longue branche du syphon toute la colonne qui peut être soutenue, et faisant sortir du liquide peu à peu par le sommet de la courte branche.

443. Lorsque l'espace capillaire n'est pas cylindrique comme nous l'avons supposé, il se produit des phénomènes un peu plus complexes qui peuvent souvent être ramenés à des lois assez simples.

Tubes concentriques. Concevons un tube qui ait, par exemple, 10 millimètres de diamètre intérieur, dans lequel on dispose un cylindre de verre de 9 millimètres de diamètre, de manière que leur axe soit commun et qu'il reste autour du cylindre un espace annulaire de 1/2 millimètre d'épaisseur. Les phénomènes capillaires se développeront dans cet espace, et l'on trouve, par expérience, que la différence de niveau est la même qu'elle serait dans un tube de 1/2 millimètre de *rayon*. Ce résultat étant général, on peut l'énoncer ainsi : dans un espace annulaire d'une épaisseur quelconque, l'ascension ou la dépression est la même que dans un tube dont le diamètre serait double de cette épaisseur.

Quand le cylindre intérieur est lui-même un tube, les phénomènes se produisent séparément dans ce tube et dans l'espace annulaire, comme si chacun d'eux était seul. Ainsi le diamètre du tube étant précisément double de l'épaisseur annulaire, les sommets des deux colonnes sont au même niveau ; si le tube est plus fin, le sommet de sa colonne est plus haut, s'il s'agit d'une ascension, et plus bas, s'il s'agit d'une dépression ; c'est le contraire quand le tube est plus large. Dans ce dernier cas, si l'on verse du liquide jusqu'à ce que le menisque annulaire devienne convexe (*Fig.* 9), la dépression se change évidemment en ascension. Ce phénomème avait singulièrement étonné un observateur habile, le médecin Petit. (*Acad. des sciences*, 1723.)

Lames parallèles. L'espace compris entre deux lames parallèles (*Fig.* 14), n'est en quelque sorte que la limite de l'espace annulaire dont nous venons de parler, car si le tube et le cylindre avaient un grand rayon, ils pourraient

être regardés comme parallèles dans une portion considérable de leur contour. Ainsi les hauteurs des colonnes soulevées ou déprimées, doivent suivre la même loi. C'est en effet ce que l'expérience démontre : quelle que soit la distance des deux lames, elles produisent le même effet qu'un tube cylindrique dont le diamètre est double de cette distance. Pour rendre les lames parallèles, on place entre elles plusieurs brins de fil de métal, coupés bout à bout dans le même fil ; leur distance est donnée par le diamètre du fil ; et, en faisant abstraction de la courbure que prend la colonne vers les bords verticaux des lames, on voit que son sommet doit être un menisque, ayant la forme d'une rigole ou d'un demi-cylindre creux dont le diamètre est la distance des lames elles-mêmes.

Lames inclinées. La figure 16 représente deux lames inclinées qui se coupent suivant une ligne verticale ; elles sont unies par deux charnières cc', et peuvent être écartées plus ou moins. Lorsqu'on les plonge dans l'eau le liquide doit monter à des hauteurs inégales en a et en b, puisque les distances correspondantes des lames sont elles-mêmes inégales, et puisque les hauteurs sont, entre les lames, comme dans les tubes, en raison inverse des distances. Il est facile de démontrer par un calcul très-simple que le sommet de la colonne forme une hyperbole équilatère dont les asymptotes sont, d'une part, la commune intersection des lames, et de l'autre le niveau du liquide dans lequel elles plongent.

La figure 19 représente deux lames qui sont de même inclinées l'une à l'autre ; mais elles se coupent suivant une ligne horizontale, et le plan géométrique qui diviserait leur angle en deux parties égales, peut être lui-même horizontal ou plus ou moins oblique à l'horizon. Lorsqu'on place entre ces lames une goutte d'eau qui les touche *l'une et l'autre*, on voit qu'à l'instant cette goutte s'arrondit en cercle, et se précipite vers le sommet de l'angle ;

sa vitesse augmente ou diminue suivant que l'angle est plus grand ou plus petit, et dans tous les cas, en laissant la lame supérieure horizontale; et en inclinant convenablement la lame inférieure, on peut combattre la force attractive qui sollicite la goutte à monter vers le sommet, par la force de sa pesanteur qui la sollicite à glisser le long du plan incliné sur lequel elle repose. C'est un moyen, peu précis à la vérité, mais enfin c'est un moyen qu'on a employé autrefois pour mesurer l'énergie de la force capillaire.

Tubes coniques. — Les phénomènes dont nous venons de parler, se reproduisent dans les tubes coniques, avec les mêmes circonstances et par les mêmes causes. La petite colonne *mm'* (*Fig.* 22 et 23) se précipite vers le sommet du cône ou vers sa base, suivant qu'elle est terminée par deux menisques concaves ou par deux menisques convexes, et dans les deux cas on peut la retenir dans une position fixe en inclinant convenablement l'axe du cône dans un sens ou dans l'autre.

On voit pareillement que dans les tubes coniques verticaux, soit que le liquide doive y être soulevé ou déprimé, la hauteur de la colonne ne dépend que du diamètre du tube dans le point où elle s'arrête : au-dessus ou au-dessous de ce point les dimensions n'ont plus d'influence. Pour rendre ce résultat sensible, concevons un entonnoir ou une large cloche (*Fig.* 8) ayant, par exemple, 50 millimètres de hauteur verticale entre sa base et son sommet, et supposons qu'elle se termine par un petit tube de 1/2 millimètre de diamètre : il est évident que si on la pose sur l'eau, le liquide n'y montera pas de lui-même; mais si on l'enfonce jusqu'au tube capillaire pour la soulever ensuite presque à fleur d'eau, toute la masse liquide y restera suspendue et il y aura encore une colonne d'environ 10 millimètres dans le petit tube, parce qu'à un demi-millimètre de diamètre correspond une colonne de près de 60 millimètre de hauteur (441), et que tout ce qui est

hors de cette colonne se soutient de soi-même par les pressions opposées.

Tubes prismatiques. — Il y a un tel attrait de curiosité à l'étude des phénomènes capillaires que les physiciens en ont poursuivi toutes les modifications par une foule de recherches ingénieuses. Après avoir épuisé toutes les combinaisons que l'on peut faire avec des lames des cônes et des cylindres, un observateur habile, Gellert, imagina de faire construire des tubes prismatiques pour examiner la forme des menisques et mesurer les hauteurs correspondantes des colonnes liquides qu'ils pouvaient soulever. (*Comm. de Pétersbourg*, t. 12.) Au moyen de ces tubes dont les sections étaient des triangles et des rectangles, il établit deux lois générales assez simples, savoir : 1° que les hauteurs sont réciproques aux lignes *homologues* des bases, quand ces bases sont *semblables*, et 2° que les hauteurs sont les mêmes quand les bases ont des surfaces *équivalentes*. Il paraît cependant que cette seconde loi est soumise à quelques exceptions, ou plutôt qu'elle conduit à quelques inexactitudes.

Surfaces de différentes formes. — Ce qui précède nous montre assez clairement que les solides et les liquides ne peuvent pas se toucher sans que la surface mobile du liquide n'éprouve, près du contact, une déformation plus ou moins marquée.

Les inflexions de la courbure dépendent de la forme des corps. Il y a toujours ascension d'un liquide quand il mouille la surface, et dépression quand il ne la mouille pas. Les figures 31, 32, 33 et 34 représentent l'effet des lames, la figure 15 celui des cylindres verticaux, les figures 35, 36, 37, 38, 39 et 40 celui des balles flottantes, les figures 20 et 21 celui des parois des vases, la figure 18 celui des cylindres horizontaux, et la figure 25 celui que produisent les insectes légers qui marchent, ou plutôt qui glissent sur la surface des eaux, car les extrémités par lesquelles ces in-

sectes touchent les liquides exercent aussi une action capillaire, et si elles pouvaient être mouillées elles seraient bientôt submergées; mais un enduit particulier sur lequel l'eau n'a aucune prise, les préserve du danger.

444. *Attraction et répulsions qui résultent de la capillarité.*—Une seule lame suspendue verticalement dans un liquide n'éprouve aucun mouvement de translation, soit que le liquide la mouille, soit qu'il ne la mouille pas; le résultat de cette expérience s'explique en observant que dans chaque cas, les forces sont égales de part et d'autre. Deux lames verticales et parallèles mises en présence, n'éprouvent non plus aucune action, ni aucun mouvement, tant qu'elles sont assez éloignées l'une de l'autre pour que les courbures des liquides soulevés ou déprimés, (*Fig.* 32 et *Fig.* 33) soient séparées par un espace rectiligne *a a'*; mais dès qu'on les approche assez pour que cet espace rectiligne disparaisse et que *les courbures se croisent*, il s'exerce entre les lames une attraction sensible, à l'instant elles se précipitent pour se joindre et se presser l'une contre l'autre. Cette action qui est également attractive quand les deux lames sont mouillées, et quand elles ne le sont pas, devient au contraire une action répulsive quand l'une d'elles peut être mouillée sans que l'autre le soit. C'est ce que M. Haüy a démontré par l'expérience (*mécaniq. céleste. Supplément à la théorie de l'action capillaire*, page 47) en approchant graduellement une lame d'ivoire d'une lame de talc; cette dernière substance n'est pas susceptible d'être mouillée par l'eau, tandis que l'ivoire se mouille aisément, et le liquide étant alors déprimé d'un côté et relevé de l'autre, prend une courbure infléchie comme on le voit dans la figure 34. Mais il paraît que si l'on force cette première répulsion, et si l'on contraint les lames à se rapprocher à une distance de plus en plus petite, elles commencent bientôt à s'attirer, et se précipitent aussi comme si la colonne liquide qui les sé-

pare, était terminée à son sommet par un menisque simplement concave ou simplement convexe.

De petits corps ronds flottans sur les liquides présentent des phénomènes d'attraction et de répulsion tout-à-fait analogues et dépendans de la même cause.

Par exemple, deux balles de liége ou de bois flottantes sur l'eau, ou deux balles d'étain flottantes sur le mercure, exercent l'une sur l'autre une attraction dès qu'elles sont à une *distance capillaire*, c'est-à-dire à une distance assez petite pour que les courbures du liquide se croisent; ainsi à la distance A B elles sont sans action, et à la distance A' B' elles s'attirent. (*Fig.* 35 et 38.)

Deux balles qui ne se mouillent pas, comme des balles de cire ou de liége enfumées, flottantes sur l'eau, ou des balles de fer sur le mercure, exercent aussi une attraction dans les mêmes circonstances. (*Fig.* 36 et 39.)

Enfin deux balles dont l'une se mouille tandis que l'autre ne se mouille pas, se repoussent toujours lorsqu'elles arrivent à la distance capillaire (*Fig.* 37 et 40); mais pour compléter l'analogie avec les lames, il faudrait qu'à une certaine distance plus petite, cette répulsion se changeât en attraction; c'est, je crois, ce qu'on a négligé de vérifier par l'expérience.

Les cylindres flottans peuvent, pour ces phénomènes être assimilés aux balles flottantes; seulement à cause de leur forme, ils présentent quelques particularités faciles à observer.

Dès qu'ils sont à la distance capillaire, ils s'attirent et se rangent parallèlement; s'ils ont la même longueur, leurs extrémités se mettent au même niveau, et si on les écarte de cette position en les poussant longitudinalement, ils y reviennent par une série d'oscillations. C'est ce que l'on peut vérifier aisément avec des aiguilles ordinaires, légèrement enduites de graisse et posées avec précaution sur la surface de l'eau. (*Fig.* 18.)

En général, tous les corps flottans éprouvent par la même cause des mouvemens plus ou moins rapides lorsqu'ils s'approchent les uns des autres, ou lorsqu'ils approchent des parois contre lesquelles les surfaces liquides se courbent toujours, soit par ascension, soit par dépression. Par exemple, dans un vase d'eau qui n'est pas plein (*Fig.* 20), tous les petits corps mouillés se précipitent vers le bord, et ceux qui ne le sont pas s'en éloignent, tandis que dans un verre trop plein (*Fig.* 21) c'est le contraire qui arrive.

On avait pensé d'abord que ces mouvemens résultaient d'une action directe de la matière; mais il est bien évident qu'ils dépendent des courbures des surfaces, puisque les mêmes corps qui se fuient ou qui s'attirent sur l'eau n'exercent aucune action à distance égale dans le vide, ou même dans l'air, ou dans d'autres milieux qui les enveloppent de toutes parts.

445. *Adhésion des liquides contre les surfaces solides.* Lorsqu'un disque solide est posé sur la surface d'un liquide, on ne peut plus le soulever horizontalement comme s'il était libre dans l'air, mais il faut faire un effort un peu plus considérable. Pour mesurer cet effort, on se sert d'une balance : d'un côté on met le disque horizontal, de l'autre on met des contrepoids, et quand l'équilibre est établi, on approche une surface liquide jusqu'à l'instant où elle touche la surface inférieure du disque; alors on ajoute peu à peu et sans secousse des poids du côté opposé, et l'on note combien il a fallu en ajouter pour rompre l'adhésion. Ce procédé a été imaginé par Taylor, et les résultats qu'en ont obtenus Cigna, Guyton, et beaucoup d'autres physiciens, ont donné naissance à de longues discussions. Nous nous contenterons de rapporter ici les résultats de M. Gay-Lussac.

Pour détacher un disque de verre de $118^{mm},366$ de diamètre, il a fallu différens poids suivant la nature des liquides, comme on le voit dans le tableau suivant.

Noms des substances.	Densité.	Température.	Poids nécessaire pour détacher un disque dont le diam. = 118mm,366.
			grammes.
Eau.	1,000	8,5	59,40
Alcool.	0,8196	8	31,08
Id.	0,8595	10	32,87
Id.	0,9415	8	37,15
Essence de térébenthine.	0,8695	8	34,10

Un disque de même diamètre, de cuivre ou de quelque autre substance capable de mouiller les liquides, donne exactement le même résultat. Ainsi l'adhésion est, comme la capillarité, indépendante de la nature des solides et dépendante seulement de la nature des fluides. Il est facile d'en concevoir la raison, car, en se soulevant, le disque emporte toujours une couche de liquide. L'effort des poids additionnels n'est donc pas appliqué à séparer les molécules du disque des molécules du liquide, mais bien à rompre *la cohésion* qui unit les molécules liquides entre elles. Les expériences dont il s'agit donnent donc une mesure de la cohésion du liquide ou de l'attraction qu'il exerce sur lui-même, et l'on voit que cette attraction, toujours très-sensible, est variable dans les divers liquides.

Lorsque la surface du disque est de telle nature qu'elle n'est pas mouillée par le liquide, comme il arrive, par exemple, pour le mercure et le verre, alors le poids qu'on ajoute pour les séparer n'exprime plus la cohésion du liquide, mais aussi il est très-variable, et M. Gay-Lussac a observé que pour séparer du mercure un disque de verre de 118mm,366 de diamètre, on devait employer tantôt 296 grammes, tantôt 158, suivant qu'on mettait un temps

plus ou moins long à ajouter les poids. Cependant ces expériences font voir d'une manière frappante que, même dans le cas où un solide n'est pas mouillé par un liquide, il s'exerce encore entre les molécules du solide et celles du liquide une attraction plus ou moins forte. Cette conséquence paraît être sans exception ; seulement la cohésion du liquide est alors toujours plus grande que l'attraction que le solide exerce sur lui.

446. *Divers effets de la capillarité.* — Huyghens observa en 1672 (*Journal des savans*, pag. 111) un fait qui parut alors fort étonnant. Un tube de 70 pouces de longueur et de quelques lignes de diamètre, ayant été bien nettoyé à l'alcool, puis rempli de mercure, purgé d'air et retourné avec précaution, toute la colonne resta suspendue dans le tube ; il fallut plusieurs secousses légères pour qu'elle se détachât du sommet et prît sa hauteur ordinaire de 28 pouces dans l'intérieur du tube. C'est évidemment un phénomène d'adhésion ; il se reproduit toutes les fois que la surface intérieure du tube est bien nette et l'appareil bien purgé d'air.

Don Casbois fit, vers 1780, une remarque importante pour la construction des baromètres. Ayant fait bouillir le mercure pendant très-long-temps dans un tube barométrique, il s'aperçut, après l'avoir retourné, que le sommet de la colonne formait un ménisque à peu près plan, et même plutôt concave que convexe. On voit par ce qui précède que cette forme de ménisque doit avoir une grande influence sur la hauteur des baromètres, qui n'ont pas comme celui de M. Gay-Lussac l'avantage d'être corrigés d'avance de tous les effets de la capillarité. La cause de ce singulier phénomène a été long-temps inconnue, et l'on doit à M. Dulong une observation récente qui l'explique complétement. M. Dulong a reconnu, par des expériences directes, qu'en prolongeant l'ébullition du mercure à l'air, il se forme un oxide qui se dissout dans le liquide, et cette

espèce de dissolution, assez peu différente du mercure par sa densité, en est très-sensiblement différente par ses propriétés capillaires, puisqu'elle acquiert à la fin la propriété de mouiller le verre. Ainsi, pour faire de bons baromètres à cuvette, il faut, autant qu'il est possible, éviter le contact de l'air pendant l'ébullition du mercure.

On doit au P. Abat l'expérience suivante: ABC, *fig.* 24, est un tube recourbé contenant du mercure; le liquide s'y trouve d'abord au même niveau A c dans les deux branches; mais si, après avoir un peu incliné ce tube de manière que le mercure monte vers c′ et descende vers A′, on le ramène ensuite doucement dans sa première position, les sommets des colonnes ne sont plus exactement nivelés; celui qui s'était élevé reste plus haut, et en même temps sa convexité est plus grande; l'autre reste plus bas, et sa convexité paraît moindre. C'est un effet de la forme des ménisques qui montre combien il faut prendre de soins dans les observations barométriques et combien il est nécessaire à chaque fois de vaincre par de légères secousses le frottement du mercure contre le verre. Pour que le liquide prenne sa véritable hauteur, il faut, comme nous l'avons déjà dit, que le sommet de la colonne prenne sa véritable forme.

Les divers degrés de courbure que prend une goutte de liquide, suivant ses dimensions et suivant la nature des corps qu'elle touche, sont aussi des conséquences de l'attraction de ses molécules sur elles-mêmes, et de leur attraction sur les molécules du corps. Les très-petites gouttes de mercure, d'eau, d'alcool, etc., forment des sphères à peu près parfaites sur les corps qu'elles ne mouillent pas; alors elles roulent comme de petits globules solides. On voit même, en filtrant les liqueurs, des gouttes assez volumineuses rouler long-temps sur la surface du liquide, parce que la petite couche d'air qui les enveloppe empêche le contact immédiat; mais à mesure

que les gouttes prennent du volume, elles s'élargissent de plus en plus, et c'est alors par la courbure des contours que l'on peut juger de l'action que leurs molécules exercent sur les corps qu'elles touchent.

La capillarité ne se manifeste pas seulement au contact des solides et des liquides, on l'observe encore entre les solides eux-mêmes : c'est elle qui retient pressés l'un contre l'autre des plans polis de verre, de marbre, etc., même quand les pressions de l'air sont supprimées. On l'observe pareillement entre les solides et les gaz, car en mettant sous le récipient de la machine pneumatique un vase qu'on vient de remplir d'eau, on aperçoit des bulles nombreuses se former sous le liquide, tapisser toutes les parois, et grossir de plus en plus à mesure que la pression diminue. Des feuilles métalliques, comme l'or battu, présentent ce phénomène d'une manière encore plus sensible, car les bulles d'air qui se forment à leur surface après qu'on les a submergées, deviennent sous le récipient, comme autant de petits ballons qui les font monter ou descendre suivant le degré de pression.

447. *Indications théoriques.* La théorie des phénomènes capillaires appartenant essentiellement à l'analyse mathématique, nous devons nous borner à faire connaître les principes physiques sur lesquels les géomètres ont établi leurs calculs. Ces principes se réduisent en dernier résultat, 1° à admettre dans chaque liquide une *force de cohésion* particulière, c'est-à-dire, une force attractiv e entr les molécules voisines, et 2° à admettre entre les solides et les liquides une *force d'adhésion*, c'est-à-dire, une autre force attractive qui agit entre leurs diverses molécules. Mais ces deux espèces de forces attractives ne pouvant être caractérisées que par leur intensité relative pour une même distance, et par la loi suivant laquelle elles décroissent à mesure que la distance augmente, on conçoit que, faute de données sur ce point, on est con-

damné à choisir entre une foule d'hypotèses également probables, ou du moins également possibles, et que l'explication à laquelle on arrive dépend de l'hypotèse qu'on adopte. C'est ainsi qu'on a vu paraître d'abord les théories de Jurin, Clairaut, Segner, et dernièrement celle de M. de Laplace et celle du Docteur Young. Jurin attribue l'élévation de l'eau dans les tubes capillaires à l'attraction de la partie annulaire du tube à laquelle le sommet de la colonne est contigu; Segner et le Docteur Young considèrent les ménisques qui terminent les colonnes soulevées ou déprimées, comme des surfaces élastiques agissant par leurs tensions; Clairaut, sans entrer dans l'explication détaillée des phénomènes, s'élève en quelque sorte au-dessus de toutes les hypotèses par la fécondité de son analyse, et démontre ce résultat remarquable, savoir : que si la loi d'attraction de la matière du tube sur le fluide ne diffère que par son intensité de la loi de l'attraction du fluide sur lui-même, le fluide s'élevera au-dessus du niveau, tant que l'intensité de la première de ces attractions surpassera la moitié de la seconde. Si elle en est exactement la moitié, il est facile de s'assurer que le fluide aura dans le tube une surface horizontale, et qu'il ne s'élevera pas au-dessus du niveau. Si les deux intensités sont égales, la surface du fluide dans le tube sera concave, de la forme d'une demi-sphère, et il y aura élévation du fluide. Si l'intensité de l'attraction du tube est nulle ou insensible, la surface du fluide dans le tube sera convexe, de la forme d'une demi-sphère, et il y aura dépression du fluide. Entre ces deux limites, la surface du fluide sera celle d'un segment sphérique, et elle sera concave ou convexe, suivant que l'intensité de l'attraction de la matière du tube sur le fluide sera plus grande ou plus petite que la moitié de celle de l'attraction du fluide sur lui-même.

M. de Laplace admet que les forces attractives qui produisent les phénomènes capillaires décroissent avec

une telle rapidité, qu'elles sont nulles à des distances sensibles; et quand un liquide s'élève dans un tube, il suppose qu'une couche infiniment mince de ce liquide s'attache d'abord aux parois du tube, et forme un tube intérieur qui agit seul par son attraction pour soulever la colonne et pour la maintenir à une hauteur déterminée qui dépend de la cohésion du liquide et de sa densité. C'est en partant de ces principes qu'il explique tous les phénomènes précédens, et ses explications reproduisent les faits observés avec une telle exactitude, qu'il n'existe peut-être en physique aucune théorie qui soit aussi complétement justifiée par l'expérience. (*Mécanique céleste*, supplém. au xe livre.)

Cependant il y a plusieurs phénomènes remarquables qui dépendent probablement de la capillarité, et qui ne peuvent jusqu'à présent être rattachés à aucune théorie; nous devons les indiquer ici comme des données premières qui exigent de nouvelles recherches. Ces phénomènes conduiront sans doute les physiciens à quelques découvertes, et les géomètres à de nouvelles formules pour les représenter; car il faut, avant tout, que les effets soient mesurés avec précision, pour que l'analyse puisse remonter aux causes et en développer les lois.

448. *Absorption et filtration.* L'action absorbante que les corps poreux exercent sur les liquides qui les peuvent mouiller est évidemment une action capillaire; tous leurs petits interstices sont analogues à des tubes plus ou moins fins; leurs parois se revêtent d'abord d'une couche liquide, et cette couche agit ensuite pour attirer le liquide voisin en vertu de sa densité, et pour le retenir en vertu de sa cohésion. La rapidité de l'absorption dépend en général de la forme et de la grandeur des pores du corps absorbant, de l'attraction que par sa nature il exerce sur l'air dont il est imprégné, de celle qu'il exerce sur le liquide, et enfin de celle que le liquide exerce sur lui-même. Tous

les corps étant poreux, il semble que tous doivent être absorbans; mais nous avons vu qu'il fallait distinguer les pores dépendans de la nature des substances et les pores dépendans de la structure ou de l'arrangement des parties: les premiers, n'étant que les intervalles *nécessaires* qui séparent les molécules des corps, ne sont pas aptes en général à recevoir des molécules étrangères, tandis que les pores accidentels sont presque toujours, par leurs dimensions, capables de recevoir les liquides qui mouillent leurs parois. Aussi les masses régulièrement cristallisées ne possèdent que très-rarement quelque faculté absorbante, et au contraire les masses irrégulièrement agrégées, ou celles qui résultent d'un amas de poussière ou de fragmens très-petits, sont toujours des masses absorbantes. Il n'y a pas, dans la nature inorganique, une seule exception à cette loi, et il ne peut y en avoir dans la nature organique, puique ici toutes les parties solides sont des tissus, des lacis de fibres, ou en général des assemblages destinés à recevoir un aliment, et par conséquent à recevoir les fluides qui le portent.

La filtration de l'eau au travers des *pierres à filtrer*, ou au travers du sable et du charbon, celle des liqueurs spiritueuses au travers des papiers sans colle, et celle de plusieurs liquides au travers des tissus de laine ou de coton, sont autant d'exemples de l'absorption que certains corps exercent sur certains liquides. Car un filtre n'agit pas comme un crible, pour arrêter seulement les parcelles qui sont trop grosses, mais il se mouille par la capillarité, il transmet le liquide indépendamment de la pression, et toutes les gouttes qui passent ont été, dans leur trajet sinueux, constamment soumises à une attraction plus ou moins forte.

Lorsqu'un liquide tient en dissolution quelque corps solide, liquide, ou gazeux, il n'arrive presque jamais que les substances absorbantes auxquelles on peut le soumettre exercent une action égale sur les divers élémens

qui le composent, et l'on peut se proposer d'examiner si, dans certains cas au moins, l'action capillaire n'est pas capable de rompre l'affinité chimique, et de séparer le dissolvant du corps dissout. Cette question me semble assez curieuse, et en appelant sur elle l'attention des physiciens, je crois pouvoir indiquer d'après quelques essais que les gaz peuvent souvent être dégagés par *l'absorption*, du liquide qui les contient, et que souvent aussi des dissolutions changent de densité en traversant des filtres très-épais, et doués d'une grande action capillaire.

449. *Absorption dans les végétaux.* La sève se répand dans toutes les parties des plantes, depuis l'extrémité des racines jusqu'à la pointe des branches ou des feuilles les plus élevées : cette diffusion du liquide nourricier par des interstices plus ou moins déliés, et souvent même par des tubes d'un diamètre sensible, est un phénomène qui offre nécessairement quelques analogies avec les phénomènes capillaires. C'est pourquoi nous rapporterons ici les résultats des expériences les plus remarquables qui ont été faites sur ce sujet ; nous les emprunterons surtout à la Statique des végétaux de Hales, ouvrage qui reste encore après un siècle de date, non-seulement comme un modèle de sagacité et de précision, mais encore comme un des recueils les plus complets sur ce point important de la physiologie végétale.

Pour trouver *la quantité d'eau absorbée et évaporée par diverses plantes*, Hales se servait de l'appareil suivant (fig. 30).

p p', pot en terre sans ouverture au fond.

l l', lame de plomb, en deux parties, scellées avec un mastic de cire et de térébenthine, sur le contour du pot, et au diamètre de jonction.

o, ouverture pour laisser passer la tige.

t, tube pour arroser et laisser sortir ou entrer l'air.

La plante étant arrosée et pesée le matin et le soir, on peut voir aisément ce qu'elle absorbe et ce qu'elle perd en un jour. La perte se fait sur toute sa superficie, et il suffit d'un calcul très-simple pour trouver l'épaisseur de la couche d'eau qui s'évapore sur l'unité de surface et même pour conclure la vitesse avec laquelle le liquide s'élève par la tige. Voici le tableau des principaux résultats.

Noms des plantes.	Quantité d'eau absorbée en 12 h. du jour évaluées en pouces cubes.	Section de la tige en pouces carrés.	Vitesse du liquide dans la tige, ou nombre de pouces qu'il parcourt en 1 h.
Grand soleil. . .	36	1	3
Chou.	32	2/3	4
Vigne.	9	1/4	3
Pommier.	15	1/4	5
Citronnier. . . .	10	1	5/6

La quatrième colonne indique la vitesse avec laquelle le liquide s'élève dans la tige en supposant qu'elle soit tout-à-fait creuse comme un tube; ainsi, la vitesse réelle est beaucoup plus grande; dans le cas de la vigne, par exemple, dont la section était de 1/4 de pouce carré, Hales avait trouvé par quelques essais que la partie solide occupait les 3/4 de cet espace, les issues par lesquelles s'élevait le liquide étaient donc 1/16 de pouce seulement, et la vitesse réelle était par conséquent de 12 pouces par heure, ou d'un pouce par 5 minutes.

Je n'ai rapporté les nombres précédens que pour donner une idée des phénomènes, car on suppose bien qu'ils dépendent de l'état de l'atmosphère, de l'état de la plante,

de l'étendue de ses racines, et surtout de la quantité de ses feuilles ou de la surface par laquelle elle transpire.

Cependant MM. Desfontaines, de Mirbel et Chevreul ont répété en 1811, avec le même succès que Hales, l'expérience sur l'absorption du grand-soleil (*Helianthus annuus*), et ils ont obtenu presque le même résultat.

Après avoir constaté l'existence de cette force d'aspiration, Hales essaya d'en déterminer la mesure au moyen de l'appareil suivant, *fig.* 27.

c c', cuvette remplie de mercure.

t, tube de quelques lignes de diamètre, terminé par un tube plus large T.

R, rameau pénétrant dans le tube T, mastiqué avec soin, et recouvert de plusieurs doubles de vessie humide fortement serrés sur le tube et sur le rameau.

Les tubes étant remplis d'eau, on en plonge l'extrémité inférieure dans la cuvette de mercure, et l'on abandonne l'expérience à elle-même; la force d'aspiration est mesurée par la hauteur verticale des colonnes d'eau et de mercure qui sont soulevées et qui restent suspendues dans le tube. Dans les expériences de cette nature il n'est pas rare que des rameaux vigoureux, de 1 pouce de diamètre, revêtus de leurs feuilles, fassent monter le mercure de plusieurs pouces dans le tube; et dans une des expériences de Hales, une tige de pommier de pommes d'or de 3 pieds de longueur, le fit monter de près de 12 pouces en trois heures de temps, au mois de juillet, par un soleil très-chaud.

Une expérience remarquable prouve que cette force d'aspiration n'est pas une force ascensionnelle dans le sens naturel de la tige, car l'absorption se fait avec la même puissance quand la tige est renversée. (*Fig.* 28.)

Enfin il paraît résulter d'un grand nombre d'expériences de Hales que la force d'aspiration est sensiblement proportionnelle à la surface d'évaporation, car, en ôtant les

feuilles, en ébranchant les tiges, ou en les coupant plus ou moins près du tube d'aspiration, on voit cette force se réduire progressivement.

Des cendres bien scellées dans un long tube vertical exercent aussi une force d'aspiration considérable; d'autres corps pulvérisés produiraient sans doute le même effet, et avec d'autant plus d'énergie qu'ils auraient plus d'affinité pour l'eau, c'est-à-dire qu'ils se mouilleraient plus facilement; mais pour observer dans ces circonstances une aspiration continuelle, il faudrait qu'il y eût dans les parties supérieures une continuelle déperdition, soit par évaporation, soit de quelque autre manière : le bois lui-même n'aspire qu'à cette condition, car une tige droite sans branche absorbe très-bien, mais elle ne peut jamais faire monter le liquide au-dessus de son extrémité supérieure, lors même qu'on y adapte un tube pour le recevoir.

C'est d'après Hales et les autres observateurs que nous avons décrit ces phénomèmes ; nous avons employé leur langage, et comme eux, nous les avons attribués, pour un moment, à une *force d'aspiration*. Mais, avant d'admettre une force nouvelle pour expliquer un fait, il faut être bien assuré que les forces connues sont incapables de le produire; or, dans tout ce qui précède il n'y a rien qui ne puisse rigoureusement être produit par la double action des pressions atmosphériques et de la capillarité. En effet, reportons-nous à la figure 27 et considérons l'appareil à l'instant où il vient d'être retourné.

1° A l'extrémité *x* de la tige s'exerce de *bas en haut* une pression atmosphérique moins la hauteur de la colonne d'eau contenue dans les deux tubes ; cette pression sera, par exemple, de 28 pieds d'eau, à peu près, si les tubes ont ensemble 4 pieds de hauteur verticale.

2° Il paraît certain que le rameau R, tandis qu'il est vivant et rempli d'humidité, ne peut pas plus laisser entrer l'air par les pores sans nombre qui couvrent ses feuilles et

son écorce, que ne le ferait un tube rempli de cendres humides et fortement pressées. Ainsi la pression atmosphérique qu'il supporte sur tous les points de sa surface, ne se transmet pas au liquide qu'il contient pour le faire *couler de haut en bas*. La pression de *bas en haut* qui s'exerce en x a donc toute son efficacité pour pousser le liquide dans la tige et pour le refouler jusqu'à la surface des feuilles où il se dissipe par l'évaporation. On peut donc admettre que la pression atmosphérique fait monter le liquide, que la capillarité favorise cette ascension, et qu'elle agit surtout pour le retenir, ou plutôt pour empêcher que l'air n'entre par les pores superficiels et ne le fasse couler de haut en bas.

Il serait important de faire quelques nouvelles séries d'expériences pour mettre à l'épreuve cette opinion.

On ne manquera pas, sans doute, d'élever contre elle plusieurs objections, et parmi les premières qui se présentent, on demandera surtout pourquoi l'absorption perd de sa force à mesure que les plantes perdent de leur vigueur, et comment la pression atmosphérique et la capillarité peuvent pousser la sève jusqu'à la cime des plus grands arbres et la retenir à cette hauteur, qui dépasse souvent une centaine de pieds. Mais sur le premier point on peut remarquer que la cessation de la vie entraîne dans les plantes une désorganisation plus ou moins prompte, et qu'il ne faut pas long-temps pour que les cloisons si fragiles de leurs tissus soient complètement altérées ; sur le second point, il ne faut pas perdre de vue que si l'on avait un tube de cent pieds de long et d'un très-petit diamètre, plongé verticalement dans l'eau, ouvert en bas, fermé en haut par une membrane perméable à l'humidité, et imperméable à l'air, et qu'on le soulevât peu à peu de 99 pieds au-dessus du niveau, certainement la colonne liquide ne quitterait pas le sommet, puisque le mercure est resté suspendu à 70 pouces dans le tube d'Huyghens, qui avait une assez

grande largeur; ensuite, tout semble indiquer que les pertes qui se feraient en haut par l'évaporation seraient immédiatement compensées par une ascension nouvelle; ce serait un fait curieux à vérifier.

Au reste, si les pressions atmosphériques, combinées avec la capillarité, semblent des causes suffisantes pour expliquer la suspension de la sève, elles sont certainement insuffisantes, pour expliquer le phénomène surprenant qui se manifeste dans certaines plantes, et surtout dans la vigne, à l'époque de l'année où la *sève monte*. Ce phénomène a encore été observé et mesuré par l'illustre auteur de la Statique des végétaux; son appareil est représenté dans la *fig.* 29.

v est un cep de vigne ayant au moins trois ans, coupé net, soit perpendiculairement, soit obliquement, à l'époque *des pleurs*.

Au chicot *e* on ajuste un tube de verre *n s n'*, contenant du mercure au même niveau *nn'* dans les deux branches; les pleurs continuent, le mercure est refoulé de plus en plus, il baisse dans la branche *n*, et s'élève d'une quantité presque égale dans la branche *n'*. Hales trouva une fois une différence de niveau de 38 pouces, et par conséquent une force d'impulsion capable de faire équilibre à une colonne d'eau de plus de 40 pieds de hauteur; MM. de Mirbel et Chevreul ont obtenu 29 pouces seulement sur un vieux cep en répétant l'expérience de Hales. Il n'y a rien dans les lois connues de la capillarité qui puisse rendre raison d'une telle force ascensionelle.

Coulomb a constaté directement que dans les peupliers d'Italie la sève monte surtout par les couches qui avoisinent le canal médullaire. Cet ingénieux observateur ayant remarqué un bruissement particulier et des bulles de gaz qui se dégageaient à la file sur le tronc d'un peuplier que l'on venait de couper, fit percer d'autres peupliers vivans avec une tarière dans le sens horizontal de-

puis la surface jusqu'au cœur. Dans toutes les couches extérieures, la mèche de la tarière était à peine humide; mais dès qu'elle arrivait à quelques centimètres de l'axe, la sève s'écoulait en abondance, et des bulles gazeuses venaient crever dans l'ouverture en se succédant rapidement.

Les physiologistes ont cherché l'origine de cette force d'impulsion que reçoit la sève à une certaine époque de l'année; mais dans une question aussi délicate les faits valent beaucoup mieux que de longues discussions, et nous nous bornerons à rapporter sur ce point les expériences récentes d'un observateur plein de sagacité, auquel la science doit plusieurs découvertes originales. M. Dutrochet prit une tige de vigne de deux mètres de longueur; il en tronqua l'extrémité, et la sève se mit à couler en abondance. Pendant ce mouvement, qui se continuait avec une grande régularité, la tige fut d'un seul coup rasée près de terre, et, une fois séparée du tronc, la sève qu'elle contenait resta immobile, sans aucun signe apparent d'impulsion; le tronc donnait, au contraire, beaucoup de pleurs, et coupé à son tour à une certaine profondeur en terre, sa sève fut à l'instant arrêtée. La racine ayant elle-même été coupée de proche en proche jusqu'au *chevelu*, on vit toujours l'impulsion de la sève très-forte dans la partie restante, et complétement nulle dans la partie enlevée. Cette expérience paraît concluante, et M. Dutrochet conclut en effet que la force impulsive de la sève a son origine dans les *radicelles* nombreuses dont le *chevelu* se compose; les radicelles sont elles-mêmes terminées par un petit cône blanchâtre qu'on appelle *spongiole*, et quelques observations directes portent M. Dutrochet à penser que cet organe particulier est le véritable siége de la force impulsive. Pour donner plus de poids à cette opinion, il ne serait peut-être pas inutile de faire l'expérience en sens inverse, c'est-à-dire de couper sur une ra-

cine les spongioles ou même les radicelles, de la plonger ensuite dans de la sève fraîchement recueillie ou dans de l'eau, et d'observer si les fluides de la tige sont encore animés de quelque force impulsive. Mais soit que cette force réside dans les spongioles seulement, soit qu'elle réside dans une plus grande étendue de ces tubes déliés qui sillonnent les radicelles, le chevelu et les racines elles-mêmes, M. Dutrochet suppose qu'elle est identique avec la force *d'endosmose* et *d'exosmose* qu'il a découverte et dont nous allons essayer de donner une idée.

450. *De l'endosmose.* Les phénomènes d'endosmose découverts par M. Dutrochet sont tout-à-fait nouveaux, et ne manqueront pas sans doute d'attirer toute l'attention des physiciens et des physiologistes. Pour en mieux faire comprendre le principe, nous décrirons d'abord l'instrument au moyen duquel on peut les rendre sensibles, et que M. Dutrochet appelle *endosmomètre*.

L'*endosmomètre* se compose d'un tube T, d'un réservoir évasé K, et d'une *cloison* vv'. Le tube est en verre; il peut avoir plusieurs décimètres de longueur et quelques millimètres de diamètre intérieur; le réservoir peut recevoir diverses formes et être en verre ou en métal; dans le premier cas on le soude au tube, ou bien on y adapte celui-ci comme un bouchon à l'émeri sur le col d'un flacon; dans le second cas on peut les sceller ensemble avec un mastic convenable; la cloison est formée de la substance solide, et essentiellement poreuse, dont on veut étudier les propriétés; elle doit fermer l'ouverture du réservoir assez exactement pour que le liquide ne puisse entrer ou sortir qu'en la *traversant*.

Voici maintenant les phénomènes que l'on observe, quand, par exemple, la cloison est une membrane de vessie fortement ficelée sur les bords du réservoir, et quand il y a de l'*alcool* à l'intérieur et de l'*eau* à l'extérieur. L'endosmomètre étant soutenu verticalement dans l'eau

(*fig.* 10) sans que la cloison touche le fond du vase, l'équilibre *mécanique* s'établit bientôt entre le liquide intérieur, le liquide extérieur et la tension de la cloison. Soit N le niveau de l'eau dans le vase, et N′ le niveau de l'alcool dans l'instrument; après un quart d'heure il y aura un changement considérable, le niveau N′ se sera élevé de plusieurs millimètres, puis il continuera de s'élever; et si le tube n'a que 4 ou 5 *décimètres* de hauteur, on peut s'attendre qu'après un jour le liquide aura gagné le sommet et coulera sur les bords. Voilà sans doute un phénomène bien surprenant et bien remarquable. On ne peut l'attribuer, ni à la *capillarité ordinaire*, car elle serait à peine capable de maintenir l'alcool à quelques centimètres au-dessus du niveau extérieur, ni à une diminution dans la capacité du réservoir par la contraction de la vessie, car il y a au contraire augmentation sensible de capacité par le gonflement qu'elle éprouve. Enfin, l'eau s'est infiltrée au travers de la vessie, car on la retrouve dans l'alcool, et elle s'est infiltrée malgré la pression qui tendait à la refouler en sens contraire, et qui tendait aussi à déprimer l'alcool pour le ramener à peu près au niveau extérieur N. Il y a donc *endosmose* de *l'eau à l'alcool* au moyen de la membrane de vessie, c'est-à-dire infiltration en sens contraire des *pressions hydrostatiques*. Si l'on faisait l'expérience dans un ordre inverse, en mettant l'eau en-dedans et l'alcool en dehors, on ne peut guère douter que l'effet inverse ne se manifeste, et que le niveau intérieur de l'eau ne baisse au-dessous du niveau libre de l'alcool; il serait bon de le vérifier en y apportant quelques précautions qui ne sont point nécessaires dans l'expérience directe. On pourrait dire alors qu'il y a *exosmose* de l'eau à l'alcool; mais il est plus simple de n'employer qu'une seule expression et de dire toujours qu'il y a *endesmose*, pourvu toutefois que l'on ait soin d'indiquer l'ordre des liquides, et de ne pas exprimer simplement qu'il y a endosmose *entre* deux li-

quides mais, endosmose *de l'un à l'autre*. M. Dutrochet a reconnu :

1° Qu'il y a endosmose de l'eau à l'eau gommée, à l'acide acétique, à l'acide nitrique et surtout à l'acide hydrochlorique ; mais qu'il n'y a pas endosmose d'un liquide à lui-même, non plus que de l'eau pure à l'eau étendue d'acide sulfurique, ou réciproquement ;

2° Que diverses membranes végétales et animales jouissent à différens degrés des propriétés dont jouit la vessie ; que des plaques de terre cuite, d'ardoise calcinée, d'argile et en général de substances alumineuses en jouissent aussi, quoique à un très-faible degré (*Ann. de chim. et de physiq.*, t. 35 et 37, et l'ouvrage de M. Dutrochet, intitulé : *De l'Agent immédiat du mouvement vital*, etc., ouvrage dont on prendrait sans doute une fausse idée si l'on en jugeait par le titre).

Les forces capillaires telles qu'elles ont été considérées jusqu'à présent sont certainement insuffisantes pour produire ces résultats, car elles peuvent bien élever un liquide au-dessus de son niveau, mais elles ne peuvent jamais le faire sortir du tube ou du canal qui le contient pour l'accumuler et l'étaler sur une grande surface un peu plus élevée que le niveau primitif. Ainsi quand on plonge dans l'eau l'extrémité inférieure d'un tube de verre un peu épais, ayant, par exemple, un centimètre de longueur et un millimètre de diamètre intérieur, le liquide est bien soulevé jusqu'au sommet, puisqu'il monterait jusqu'à trente millimètres de hauteur ; mais arrivé là il s'arrête et conserve une courbure dont toute la concavité est au-dessous du plan qui termine le tube (*fig.* 17 *bis*).

La même impossibilité se manifeste aussi dans les canaux capillaires les plus irréguliers (*fig.* 17). M est une mèche de coton, une bande de drap ou une réunion de filamens capillaires quelconques qui plonge dans l'eau,

par une de ses extrémités x ; le liquide la remplit bientôt, et lorsqu'on la courbe pour abaisser son autre extrémité y, *au-dessous* du niveau n on voit le liquide qui coule goutte à goutte comme dans un syphon très-étroit ; mais dès qu'on relève un peu cette extrémité y pour la remettre au niveau n, les gouttes cessent de se former et le liquide ne peu plus sortir.

Pour expliquer les phénomènes d'endosmose, il faut donc recourir à une force différente de la capillarité ordinaire, ou au moins à quelque nouvelle modification de cette force. Voici les deux seules explications qui aient été proposées jusqu'à ce jour :

M. Dutrochet, s'appuyant sur le fait curieux que nous avons rapporté (403), suppose que la cloison de l'endosmomètre, mise en contact sur ses deux faces avec deux liquides différens, détermine un courant électrique, dont l'action est capable d'entraîner le liquide dans un sens déterminé, c'est-à-dire du pôle positif au pôle négatif. Il serait difficile de prouver directement que cette explication est bonne, mais il ne serait pas moins difficile de prouver qu'elle est mauvaise ; car si l'on démontrait qu'il se dégage en effet de l'électricité pendant l'endosmose, il serait encore permis de douter qu'elle soit la cause du phénomène, et si l'on n'en trouvait aucune trace il ne serait peut-être pas rigoureux de conclure, ni qu'il n'y en a pas, ni qu'elle n'agit pas.

M. Poisson, en tenant compte d'une circonstance que l'on avait négligée jusqu'à présent, essaie de démontrer que les forces capillaires peuvent produire des phénomènes analogues à ceux de l'endosmose (*Ann. de physiq. et de chim.*, t. 35). Concevons deux liquides A et B séparés par une cloison verticale C (*fig.* 11). Imaginons qu'ils ne communiquent entre eux que par un tube capillaire horizontal *a b*, et que les hauteurs de leurs niveaux au-dessus de *a b* soient en raison inverse de leurs densités, de telle

sorte qu'en ce point leurs pressions hydrostatiques se fassent exactement équilibre. Supposons enfin que l'action attractive de B sur A soit plus grande que celle de A sur lui-même, et que ce dernier liquide remplisse à lui seul le tube *a b*. Cela posé, considérons les actions que ce filet liquide éprouve soit de la part du tube qui l'enveloppe, soit de la part des liquides qui le touchent à chacune de ses extrémités. D'abord si le tube est homogène il ne peut lui imprimer aucun mouvement, car ses actions sont alors égales dans tous les sens et se font équilibre. Ensuite il est évident que si le liquide A exerçait sur l'extrémité *a* du filet *a b* la même action que le liquide B sur l'extrémité *b*, il y aurait encore équilibre entre ces forces, et tout resterait en repos. Mais si l'attraction du liquide B sur *b* est, comme nous l'avons supposé, plus grande que celle du liquide A sur *a*, il y *aura mouvement*, et le filet liquide coulera de A vers B, jusqu'à ce que l'élévation de niveau qui en résulte de ce côté compense par l'augmentation de pression l'excès de la force attractive de B sur la force attractive de A.

Ainsi, par la considération de l'hétérogénéité des liquides, M. Poisson est conduit à trouver dans l'action capillaire des effets qui semblent tout-à-fait identiques à l'ascension que l'on observe dans l'endosmomètre.

Cette démonstration ingénieuse présente cependant d'assez grandes difficultés : on n'y trouve, par exemple, aucun élément qui dépende du diamètre du tube de communication; il semblerait donc en résulter que des tubes plus ou moins larges détermineraient des phénomènes également intenses, ce qui est contraire à l'expérience. On peut remarquer aussi qu'elle semble s'appliquer à un cylindre solide aussi bien qu'au filet fluide, d'où l'on pourrait conclure qu'un cylindre solide, plongé horizontalement dans un fluide homogène comme l'eau, prendrait nécessairement un mouvement de translation si ses deux bases n'étaient pas de même matière et n'exerçaient pas des

actions égales sur le fluide qui les touche; enfin il faut bien que la réaction soit égale à l'action, et si le filet *ab* est attiré par les molécules du fluide B, il attire aussi ces molécules, et il n'y a pas de raison pour que le mouvement se détermine dans un sens plutôt que dans l'autre.

Ces observations tendent seulement à faire mieux sentir combien il est important de multiplier les expériences sur ces nouveaux phénomènes; car il faut des données plus précises et des mesures plus exactes pour en fonder la véritable théorie.

451. *De l'action des poisons sur les plantes.* — On distingue, en général, deux classes de *poisons*, ceux qui détruisent les tissus avec lesquels ils sont en contact dans l'économie animale, et ceux qui tuent sans produire d'altération sensible dans les organes : on croit que ces derniers frappent directement le système nerveux. Il était intéressant d'étudier sous ce double point de vue l'effet des poisons sur les plantes, et c'est ce que M. F. Marcet a fait avec beaucoup de succès (*Ann. de physique et de chimie*, t. 29, pag. 300). Les poisons corrosifs qu'il a employés sont l'oxide d'arsenic, le chlorure de mercure, le chlorure d'étain, le sulfate de cuivre, et l'acétate de plomb.

Douze grains d'oxide d'arsenic dissous dans deux onces d'eau ont fait périr, en un ou deux jours, deux ou trois plantes de haricots (*phaseolus vulgaris*) qui en avaient été arrosées. Le poison avait été charrié jusque dans les feuilles et dans les parties supérieures de la tige.

Une branche de rosier périt en quatre jours en absorbant de l'eau arseniée; elle n'avait pris qu'un cinquième de grain d'arsenic.

Quelques grains d'arsenic déposés sous l'écorce d'un lilas ou dans une fente longitudinale pénétrant jusqu'à la moelle ont suffi pour faire périr non-seulement la tige empoisonnée, mais sa racine et ses rejetons.

Les autres poisons corrosifs offrent des résultats analogues.

L'opium, la noix vomique, l'acide hydrocyanique, la belladone, la ciguë, etc., qui semblent agir directement sur le système nerveux des animaux, sont aussi très-actifs sur les plantes, ce qui semble indiquer, comme M. Marcet le conclut de ses nombreuses expériences, qu'il y a dans ces êtres organisés un système spécial analogue au système nerveux des animaux.

452. *Absorption dans les animaux.* — Les recherches les plus récentes et les plus remarquables qui aient été faites sur ce sujet sont dues à M. Magendie (*Journal de physiologie expérimentale*). Je regrette de ne pouvoir donner ici que la conclusion sommaire de ses nombreuses expériences. La faculté absorbante des vaisseaux dépend de l'état de pléthore dans lequel ils se trouvent; elle est d'autant moindre que les vaisseaux sont plus remplis et plus distendus : par exemple, dans l'état ordinaire, un chien est tué en *deux minutes* environ par l'extrait de noix vomique placé dans la plèvre, tandis qu'il périt en moins d'*une minute* lorsqu'on introduit le poison après une saignée qui diminue la tension des vaisseaux; et, au contraire, il résiste pendant *huit ou dix minutes* si l'on injecte de l'eau dans les veines avant d'introduire le poison. M. Magendie a même observé qu'en injectant de l'eau autant que l'animal en peut recevoir sans cesser de vivre, il n'y a point encore d'effet produit après une demi-heure. Il est vrai que l'animal est alors avant de recevoir le poison dans un état de grande souffrance, et l'on pourrait dire qu'il ne meurt pas par le poison, parce qu'il est à moitié mort par l'eau dont on a rempli ses veines; mais l'expérience n'en est pas moins importante, surtout en admettant que la noix vomique enlève à l'instant le reste de vitalité à un animal qui est à moitié mort par une cause autre que la pléthore; résultat qui a sans doute été vérifié par l'expérience.

CHAPITRE II.

De la structure des corps.

453. On peut étudier la structure des corps sous deux points de vue :

1° En considérant seulement leurs formes extérieures pour en déduire quelques lois générales sur leur formation, ou plutôt sur les différens modes suivant lesquels leur volume a dû prendre des accroissemens successifs et toujours réguliers; 2° en observant les propriétés physiques, souvent très-diverses, que nous présente une même substance pour en déduire quelques données sur l'arrangement intérieur de ses molécules.

L'étude des formes régulières et variées que prennent les minéraux, constitue à elle seule une science importante que l'on appelle *cristallographie;* mais comme il nous serait impossible, sans nous écarter de notre plan, de donner les premières notions de cette science, nous renverrons le lecteur au Traité de Haüy, au Traité plus récent et plus complet de M. Beudant, et aux beaux Mémoires que M. Mitscherlich a publiés sur ce sujet dans les *Annales de Chimie*, depuis 1824.

Ainsi, nous nous bornerons à examiner les propriétés physiques des corps, et les indications qu'elles peuvent nous donner sur l'arrangement moléculaire; il n'y a sur ce point aucune théorie, ou pour mieux dire, aucun fait complétement expliqué; nous serons donc réduits à présenter une simple énumération des phénomènes, en nous efforçant de rapprocher ceux qui paraissent dépendre des mêmes causes.

454. Les fluides, en général, soit à l'état gazeux, soit à

l'état liquide, nous offrent dans toutes leurs parties une mobilité si grande, qu'elle semble exclure toute idée d'arrangement déterminé. Dans une masse d'eau, par exemple, il ne faut qu'une très-petite force pour que la molécule qui est au centre se déplace et vienne à la superficie, ou pour qu'une molécule superficielle s'enfonce au contraire, et sillonne toute la masse, suivant une route plus ou moins sinueuse. Un léger mouvement, un changement de température presque insensible, sont toujours des causes suffisantes pour produire ces déplacemens et pour bouleverser toutes les positions relatives des molécules. Ce phénomène que nous pouvons observer en petit dans des vases transparens où flottent des poussières visibles, est un phénomène général qui se répète plus en grand dans toutes les masses fluides que nous offre la nature. Ainsi, dans le lac le plus tranquille en apparence, il y a tant de causes sans cesse changeantes qui sollicitent les molécules liquides, que l'on peut bien assurer aussi qu'elles sont à tout moment déplacées; de même, dans l'atmosphère pendant le calme le plus absolu, on peut être bien assuré que les molécules n'ont point de repos; et si la masse d'air paraît immobile dans son ensemble, elle n'en est pas moins agitée de mille manières dans toutes ses parties. Cette circulation perpétuelle des fluides semble indiquer une parfaite homogénéité de structure; cependant dans l'ignorance où nous sommes sur les derniers élémens de la matière, nous ne pouvons rien affirmer sur l'état d'agrégation des molécules elles-mêmes : il est possible, par exemple, qu'une molécule d'eau, qui est si mobile par rapport aux molécules qui l'environnent, soit un composé de plusieurs molécules élémentaires, assemblées par des forces permanentes, et retenues à distance dans des positions parfaitement fixes; car la fixité dans la structure des molécules secondaires n'empêcherait pas leur mobilité relative. Mais pour ne pas se faire une fausse idée de l'état d'agréga-

tion des liquides et des gaz, il ne faut admettre implicitement, ni qu'ils sont composés de molécules simples ou isolées, roulant ou glissant l'une sur l'autre avec la plus grande facilité, ni qu'ils sont composés de molécules secondaires, ou d'atomes plus ou moins nombreux, groupés d'une manière fixe, et se déplaçant tout d'une pièce, sans qu'il y ait de changement dans les positions respectives de leurs élémens; car jusqu'à présent, il n'y a dans la science aucune donnée certaine pour lever nos incertitudes sur ce point.

455. Les corps solides offrent plus de prise à nos observations, parce qu'ils peuvent, pour la plupart, prendre naissance, se former et s'accroître sous nos yeux, et parce qu'ils ont en général des propriétés qui sont en rapport avec leur structure intime. Ce sont ces propriétés que nous allons étudier, en distinguant celles qui peuvent être imprimées aux corps postérieurement à leur formation, et celles qui dépendent essentiellement de leur origine, c'est-à-dire des circonstances dans lesquelles ils ont pris leur solidité.

456. *Des changemens de structure que peuvent prendre les corps solides sans perdre leur solidité.*

Changement de forme des cristaux. M. Mitscherlich, en étudiant les propriétés optiques de la chaux sulfatée, a reconnu que dans les lames cristallisées de cette substance, la structure intérieure change avec la température, sans qu'on puisse apercevoir à l'extérieur aucune modification sensible, ni sur les côtés, ni sur les faces polies de ces lames. D'autres substances cristallisées lui ont ensuite présenté le même phénomène.

Le sulfate de Nikel, en cristaux prismatiques, ayant été exposé, en été, à la lumière solaire, dans un vase fermé, les particules ont changé de position dans la masse solide, sans que l'état fluide ait eu lieu; et lorsqu'au bout de quelques jours on a brisé les cristaux dont la forme ex-

térieure n'était point changée, on les a trouvés composés d'octaèdres à bases carrées, offrant parfois un volume de quelques lignes (*Ann. de chim.*, t. 37, pag. 205).

Le séléniate de zinc à forme prismatique, exposé au soleil sur une feuille de papier, se transforme aussi en peu d'instans en cristaux octaèdres à base carrée.

Des cristaux de sulfate de magnésie et de sulfate de zinc, chauffés graduellement dans l'alcool jusqu'au point d'ébullition de ce liquide, perdent peu à peu leur transparence; et lorsqu'on les brise, on les trouve composés d'un grand nombre de nouveaux cristaux très-petits, qui sont, pour la forme, entièrement différens de ceux qu'on avait employés.

Ces faits remarquables, et bien constatés par un habile observateur, démontrent jusqu'à l'évidence que, même dans les corps solides, les molécules constituantes n'ont pas des positions relatives invariables, mais qu'elles peuvent encore changer de place, s'arranger et passer successivement par des états d'agrégation complétement différens.

Adhésion des glaces. Quand les glaces ont reçu le dernier poli, on les essuie pour les mettre en magasin, en les dressant de champ l'une contre l'autre, à peu près comme des livres un peu inclinés dans le rayon d'une bibliothèque. Dans cette position, elles contractent avec le temps une adhésion plus ou moins forte; il arrive assez souvent qu'on ne peut les séparer sans les rompre, et quelquefois l'adhésion est si intime, que trois ou quatre glaces sont comme incorporées l'une à l'autre, au point qu'on peut les travailler ensemble, les user sur leurs bords, et enfin les couper au diamant comme on couperait une seule plaque de verre. M. Clément Desormes m'a fait voir plusieurs morceaux de deux, trois ou quatre glaces qu'il avait recueillis à la manufacture royale de Saint-Gobin, pour les soumettre à diverses épreuves. Ces échantillons formaient

des rectangles ayant plusieurs pouces de côté, et les diverses pièces qui les composaient, ainsi soudées par le temps, à la température ordinaire, n'avaient pas moins d'adhérence que si elles eussent été coulées ensemble; car il fallait une force mécanique très-grande pour les faire glisser sur leurs surfaces de jonction, et lorsqu'on croyait enfin les avoir séparées, on était très-étonné de voir qu'il n'y avait pas eu glissement, mais rupture dans l'épaisseur des glaces, de telle sorte que la surface de jonction de l'une restait couverte dans une assez grande étendue de larges lambeaux détachés de l'autre.

Changement du zéro dans les thermomètres à mercure. Nous avons rapporté (156) l'observation précieuse de M. Bellani, sur le déplacement qu'éprouve avec le temps le zéro des thermomètres à mercure. Ce déplacement a toujours lieu dans le même sens, comme si la capacité du réservoir devenait de plus en plus petite au moins pendant les premiers mois qui suivent la construction de l'instrument. Quelques physiciens attribuent ce phénomène à la pression atmosphérique qui s'exerce de dehors en dedans sur le réservoir, et qui n'est pas balancée par une égale pression de dedans en dehors quand le tube est purgé d'air; ils supposent en conséquence que, dans des thermomètres tout ouverts, le zéro resterait parfaitement fixe, et que, dans les thermomètres à alcool, la variation doit être beaucoup moindre à cause de la pression qui résulte de la vapeur alcoolique. Des expériences sur ces deux dernières espèces de thermomètres viendront sans doute confirmer ou détruire l'explication; mais en attendant qu'elles soient faites avec tout le soin qu'elles méritent, on peut présumer avec assez de raison que les réactions moléculaires dont nous venons de parler entrent pour quelque chose dans la diminution de capacité des réservoirs.

Moiré métallique. Tout le monde connaît les nuances nacrées et chatoyantes que présente le moiré métallique,

et les dessins fort singuliers qui résultent des variations de leur éclat. C'est un des phénomènes les plus propres à donner de justes idées sur la structure intérieure des corps. Une feuille de fer-blanc n'offre, dans son état naturel, qu'une surface mate, sans aucune trace d'arrangement moléculaire ; on pourrait penser que la couche mince d'étain fondu s'est simplement appliquée sur le fer, et s'y est consolidée d'une manière confuse, comme ferait à peu près une couche de suif ou de cire ; mais quand on sait avec quelle facilité se produit le moiré le plus éclatant, on est conduit à une tout autre conclusion. Il n'y a presque pas de dissolution acide qui, versée un peu chaude sur une feuille de fer-blanc, ne fasse paraître à l'instant une foule de nuances plus ou moins nacrées. Chaque ouvrier a sans doute son secret, ou plutôt sa méthode particulière pour obtenir ce résultat ; mais, en général, on fait paraître un très-beau moiré, en dissolvant une partie de sel ordinaire, et une partie d'acide nitrique dans quatre parties d'eau. Quand la feuille a été arrosée par cette dissolution, on la plonge un instant dans de l'eau acidulée, on la lave et elle est moirée. Dans cette opération, les facettes miroitantes ne sont pas produites par l'action chimique qui s'exerce sur le métal, elles sont seulement mises à découvert ; toutes les parties métalliques confusément cristallisées qui les cachaient sont enlevées ; aussi, pour varier les dessins, suffit-il de chauffer en quelques points la feuille de fer-blanc, et de la refroidir tantôt brusquement, tantôt lentement, avant de la soumettre à l'action chimique. Les divers modes de refroidissement auront déterminé des arrangemens cristallins dont la différence deviendra manifeste.

Tous les métaux qui cristallisent facilement, peuvent présenter des phénomènes analogues : il suffit, par exemple, de plonger dans un acide convenablement affaibli un culot de bismuth, pour faire paraître sur sa surface

des facettes régulières, qui attestent son état cristallin intérieur.

De l'acier damassé. Il paraît, d'après les observations récentes de MM. Faraday et Stodart, de M. Bréant et de M. Berthier, que l'acier damassé que l'on appelle aussi *vootz*, *acier de l'Inde*, ou *acier de Bombay*, ne doit son aspect moiré qu'à une cristallisation particulière du métal, ou plutôt de la combinaison qui le constitue.

MM. Faraday et Stodart, en soumettant à une haute température long-temps soutenue un fer très-carburé et de l'alumine pure, ont obtenu un alliage cassant, de couleur blanche, qui avait la propriété de donner à l'acier ordinaire toute la malléabilité et toutes les qualités physiques du meilleur acier de l'Inde. Il suffisait pour cela de faire fondre l'acier avec environ un septième ou un huitième de son poids d'alliage, et de le soumettre ensuite à l'action de l'acide sulfurique affaibli pour lui donner l'aspect des damas.

M. Bréant est arrivé au même résultat par un moyen aussi sûr et qui se prête beaucoup mieux à une exploitation en grand. Il fait son acier damassé en combinant avec le fer des proportions de charbon un peu plus fortes que celles qui donnent l'acier ordinaire. L'alliage étant en pleine fusion, on le laisse refroidir *très-lentement*, on le travaille, et ensuite on le damasse par l'immersion dans l'eau acidulée.

Enfin, M. Berthier a aussi obtenu des aciers damassés de bonne qualité en alliant l'acier, tantôt avec 10, tantôt avec 15 millièmes de chrôme; ces aciers se sont l'un et l'autre très-bien travaillés sous le marteau, ont produit d'excellentes lames et se sont moirés à l'instant par le contact de l'acide sulfurique.

Ces résultats font voir d'une manière bien frappante à quel point les propriétés physiques les plus délicates dépendent de l'arrangement des molécules; car une même

lame peut prendre des aspects damassés très-différens, et celui qu'elle présente lorsqu'elle est travaillée pour recevoir un tranchant très-vif, n'est pas le même qu'elle aurait si elle était travaillée pour être plus ou moins dure, plus ou moins malléable, ou plus ou moins élastique. Jusqu'à présent il n'y a que l'œil exercé d'un ouvrier qui puisse démêler ces nuances; mais il suffirait sans doute d'avoir des données plus précises sur les divers états d'agrégation des corps, pour en déduire avec certitude les propriétés physiques qui en résultent.

De la trempe et du recuit. L'arrangement des molécules ne se montre pas toujours par des facettes cristallines, comme nous venons de le voir dans les cas précédens; il faut souvent, pour y saisir quelque différence, avoir recours à la cassure et à tous les accidens qu'elle peut présenter; encore, dans beaucoup de cas, ces derniers moyens que nous puissions employer sont infidèles et peu sûrs, soit que nous n'en ayons pas fait une étude assez exacte, soit qu'il y ait dans les molécules des corps des groupemens si petits qu'ils nous paraissent identiques dans leur ensemble, lorsqu'ils sont individuellement très-différens. Toutes les propriétés qui résultent de la trempe sont dans ce cas : quelque tranchées qu'elles soient, il nous est à peu près impossible de démêler les diverses structures qui correspondent dans un même corps aux divers degrés de trempe; mais comme on ne voit rien en lui qui puisse varier, excepté l'arrangement de ses molécules, on est bien porté à conclure que c'est là la cause qui lui donne les qualités si singulières et si diverses que nous observons et dont nous allons essayer de prendre une idée.

Il n'y a que très-peu de corps qui soient susceptibles de recevoir la trempe : l'acier est du nombre, soit qu'il ait été obtenu *naturellement*, ou par *cémentation*, ou par *fusion*. Pour tremper l'acier, il suffit de le porter à une haute température et de le refroidir brusquement. Les

divers degrés de trempe dépendent et de l'élévation de la température et de la rapidité du refroidissement.

En partant du *rouge-blanc*, le refroidissement subit dans le mercure, dans le plomb ou dans quelque acide, donne la *trempe la plus dure;* le refroidissement dans l'eau donne une trempe un peu moins dure et le refroidissement dans les corps gras, comme l'huile ou le suif, donne des trempes encore un peu moins dures.

En partant du *rouge rose*, du *rouge vif*, du *rouge cerise*, ou du *rouge brun*, on a des trempes toujours décroissantes, c'est-à-dire toujours moins dures, et d'autant moins que le corps refroidissant est moins actif; ainsi, pour chacune de ces températures, l'huile paraît donner une trempe moins dure que l'eau, et l'eau une moins dure que le mercure.

L'acier qui a reçu la plus forte trempe est plus cassant que le verre : il arrive assez souvent que les coins qui servent à frapper les monnaies et les médailles, se brisent naturellement sans recevoir de chocs ni de pressions, même dans des lieux où la température varie peu.

Les instrumens qui doivent avoir une trempe très-dure ne doivent l'avoir en général que dans une petite partie de leur volume; aussi se garde-t-on de les tremper en entier : les burins, par exemple, ne sont trempés que dans une petite partie de leur longueur, et c'est ainsi qu'ils peuvent être très-durs à la pointe, et cependant assez solides et assez résistans dans leur ensemble.

Les ouvriers qui travaillent l'acier savent donner à chaque instrument le degré de trempe qui lui convient suivant l'usage auquel il est destiné; mais on conçoit qu'il serait bien difficile de saisir ce point avec précision si l'on n'avait pour guide que la nuance du rouge à laquelle il faut plonger l'acier dans le mercure ou dans l'eau pour lui faire prendre toutes les qualités qu'on se propose de lui donner, aussi est-il bien rare que l'on suive cette méthode.

On a un autre moyen de varier la trempe avec certitude, et pour ainsi dire à volonté : ce moyen est le *recuit ;* il repose sur la propriété que possède l'acier trempé dur, de se détremper peu à peu suivant le degré de chaleur auquel on l'expose. On commence donc par donner une trempe trop dure, et on la réduit graduellement. La seule difficulté est d'avoir une série de caractères auxquels on puisse reconnaître les divers degrés de chaleur par lesquels on passe. Or, ces caractères se présentent d'eux-mêmes dans l'acier : lorsqu'il a été trempé et qu'on l'expose pour le recuire sur des charbons allumés ou seulement sur du poussier de charbon, sa surface prend des couleurs très-marquées qui changent avec la température. Ces couleurs sont les suivantes : jaune paille, rouge pourpre, bleu violet, bleu, bleu clair couleur d'eau. Il paraît qu'en partant d'une trempe dure, il faut, pour avoir la trempe des canifs et des rasoirs, arrêter le recuit au jaune paille, l'arrêter au pourpre pour avoir celle des couteaux et des ciseaux, au bleu pour celle des ressorts de montre, et seulement à la température du rouge naissant pour avoir celle des ressorts de voiture. Il est bien rare que des pièces d'acier bien dressées ne se déforment pas par la trempe, et souvent le recuit qu'elles doivent éprouver n'est pas assez grand pour qu'on puisse les redresser au marteau ; c'est, par exemple, ce qui arrive aux aiguilles magnétiques, car il est bon de ne pas les recuire jusqu'au bleu. Dans ce cas on chauffe les pièces dans un tube ou dans un manchon de fer, afin qu'elles prennent plus sûrement une température uniforme dans toute leur étendue, et ensuite on les laisse tomber verticalement dans l'eau, d'une hauteur un peu grande, afin que tous les points de la surface soient saisis par le froid presque au même instant.

Le verre peut être trempé comme l'acier, et s'il est impossible de lui donner par le recuit la souplesse et l'élasticité des ressorts, il est possible au moins de diminuer

beaucoup sa fragilité. Tout le monde sait comment se font les *larmes bataviques*, et comment elles se réduisent en poussière dès qu'on en brise la pointe. Puisqu'elles se forment en versant du verre fondu dans l'eau froide, et puisqu'elles éclatent en mille fragmens lorsqu'on rompt en quelques points leur continuité, il est évident qu'elles sont tout-à-fait analogues à l'acier fortement trempé ; aussi lorsqu'on fait recuire une larme batavique jusqu'à une température voisine du rouge, elle devient comme du verre ordinaire et ne se brise plus que dans les points qui reçoivent le choc. C'est pour cela que dans les verreries on prend grand soin de recuire les pièces qui sont soumises pendant leur fabrication à un refroidissement un peu rapide.

Nous verrons dans la polarisation de la lumière un procédé curieux pour observer l'arrangement moléculaire des corps diaphanes, et nous reconnaîtrons par exemple que le verre est presque toujours trempé en plusieurs points de sa masse, à moins qu'il n'ait été refroidi avec beaucoup de précautions.

Il y a une substance qui présente des phénomènes de trempe d'autant plus singuliers, qu'ils sont exactement opposés à ceux que présente l'acier : cette substance est l'alliage des instrumens chinois que nous connaissons sou le nom de *tam-tam;* elle se compose de quatre parties cuivre pour une partie d'étain. Quand l'alliage des tams-tams est lentement refroidi, il est fragile comme le verre; au contraire, quand il est refroidi rapidement il devient malléable, il peut être travaillé au marteau, façonné en instrumens, et exécuter par son élasticité ces vibrations multipliées qui produisent des sons si graves et si pleins. C'est même d'après cette observation curieuse que nous pouvons maintenant en France exécuter des tams-tams, moins bons peut-être que ceux des Chinois, mais assez sonores cependant pour entrer dans nos orchestres.

On a coutume d'expliquer les phénomènes de la trempe

du verre et de l'acier, en disant que les molécules superficielles saisies par le froid se consolident brusquement en formant une espèce de voûte qui enveloppe de toutes parts le noyau intérieur, tandis qu'il est encore très-dilaté par la chaleur : si ce noyau se refroidissait librement, il diminuerait de volume; mais forcé, comme il l'est, d'occuper en se refroidissant le même espace qu'il occupait étant très-chaud, ses molécules éprouvent une grande tension et font un effort continuel pour briser la voûte de dehors en dedans, et la brisent en effet avec explosion quand une cause extérieure vient favoriser leur action. Par cette espèce de comparaison l'on explique tout au plus la facilité avec laquelle le verre trempé se brise ou se réduit en poudre, mais l'on n'explique ni la dureté que prend l'acier, ni l'élasticité, ni les autres propriétés remarquables qui correspondent aux divers degrés de trempe, et l'on n'explique pas à plus forte raison ce qui arrive à l'alliage des tamtams. On a coutume de dire aussi que les autres corps n'ont pas la propriété de se tremper, mais cela signifie seulement qu'ils n'ont pas la propriété de devenir fragiles par le refroidissement, car il est bien probable que tous les corps brusquement refroidis diffèrent des corps recuits par quelques propriétés physiques, comme ils en diffèrent par leur densité ou par la marche de leur dilatation.

De l'écrouissage. Lorsqu'un corps métallique peut-être martelé à froid sans se rompre et sans se gercer, il devient ordinairement plus ferme, plus élastique, plus sonore, et l'on dit alors qu'il est *écroui*. Le laiton, l'argent, le cuivre, l'étain et même le plomb présentent de grandes différences dans leurs propriétés lorsqu'ils ont été simplement fondus et refroidis ou lorsqu'ils ont reçu un écrouissage convenable. Ce qui se produit par le marteau se produit encore à un degré plus ou moins marqué par l'action de la lime, par celle du burin et par les pressions qui s'exercent dans les

trous des filières ou entre les cylindres des laminoirs. Lorsqu'un métal a été trop fortement écroui par l'une ou l'autre de ces actions mécaniques, il devient cassant au point qu'il est impossible de le courber ou même de continuer sur lui le même travail sans le voir se rompre ou se gercer. Alors on le fait recuire comme l'acier qui a reçu une trempe trop dure, et l'on peut sans danger le reporter sous le marteau ou lui donner d'autres traits à la filière. Toutes ces propriétés méritent quelque attention de la part des physiciens, car elles peuvent avoir une influence sur beaucoup de phénomènes, tels que l'élasticité, la dilatation, la conductibilité pour la chaleur ou pour l'électricité, et particulièrement sur les irrégularités que présentent quelquefois les instrumens de précision; car il suffit, par exemple, qu'un cercle soit inégalement écroui dans les divers points de son contour ou de son épaisseur pour qu'il se tourmente et se gauchisse avec le temps.

457. *Des propriétés que prennent les corps en se consolidant après une fusion complète ou incomplète.*

Cristallisation de l'eau. Il y a peu d'observateurs qui n'aient eu la curiosité d'examiner la congélation de l'eau, et de suivre l'accroissement des fines aiguilles de glace qui se forment d'abord à sa superficie ou sur les solides qu'elle touche. D'un instant à l'autre ces aiguilles se développent et se ramifient de mille manières par le progrès de la solidification. Il est rare, à la vérité, qu'elles prennent des formes cristallines régulières comme celles qu'on observe dans le givre ou la neige (*voyez* la météorologie), mais leur aspect suffit cependant pour montrer comment les corps solides se constituent, et comment, dans un volume donné de glace, on peut concevoir une infinité de surfaces courbes, qui séparent ce qui a été solide dans un moment de ce qui a été solide dans l'instant suivant. C'est au reste ce que nous allons mieux voir encore par d'autres exemples.

Cristallisation du soufre. Un cylindre de soufre paraît

à peu près homogène à l'extérieur, mais lorsqu'on le brise on voit autour de son axe une infinité de petites aiguilles transparentes qui se croisent sous tous les angles. Cette cristallisation régulière s'est opérée dans l'intérieur, parce que le refroidissement y a été plus lent qu'à l'extérieur. En effet, la grandeur des cristaux dépend de la masse qui était en fusion et de la rapidité de son refroidissement. En faisant fondre ensemble 50 livres de soufre, M. Mitscherlich a obtenu des cristaux d'un demi-pouce d'épaisseur qui avaient une grande régularité. Le bain était refroidi lentement pendant quatre ou cinq heures, et l'on perçait la croûte épaisse qui s'était formée au-dessus pour *décanter* le liquide intérieur. Ces cristaux, une fois formés, ne se seraient pas sans doute décomposés pendant la solidification du liquide restant; ils se seraient seulement enveloppés de nouvelles couches solides plus ou moins régulières, et lorsqu'on aurait brisé la masse après une solidification complète, *sans décantation*, la cassure, tout en présentant quelques facettes cristallines, n'aurait pu donner une juste idée de l'état d'agrégation des molécules.

Cristallisation du bismuth. Le bismuth très-pur est, parmi tous les métaux, celui qui cristallise avec la plus grande facilité; on le fait fondre dans un creuset, on le verse dans un test un peu chauffé d'avance, et l'on attend que la croûte superficielle ait acquis une solidité convenable; alors on *décante*, c'est-à-dire que l'on prend le test comme pour verser ce qu'il contient; le liquide intérieur coule après avoir percé la croûte par son poids, et la calotte solide qui reste attachée au test présente des cristaux irrisés de plusieurs lignes de surface, formant par leur arrangement mille reflets et mille accidens singuliers.

Cette expérience curieuse et la précédente sont bien propres à nous faire pénétrer la structure intérieure des corps; ce n'est qu'en suspendant ainsi leur formation, et en séparant à un instant donné ce qui est déjà solide de

ce qui reste encore liquide, que l'on peut se faire une idée des groupemens moléculaires qui constituent les masses. Et comme les cristaux qu'on obtient par ce procédé dépendent, pour leur grandeur et leur arrangement, de la vitesse avec laquelle la masse se refroidit, on ne peut douter que toute la texture d'un corps solide quelconque ne dépende des circonstances sous lesquelles il s'est consolidé.

Consolidation sous diverses pressions. La pression sous laquelle se trouve le liquide au moment où il se solidifie exerce aussi, pour l'ordinaire, une influence marquée sur l'état d'agrégation qui en résulte. Ainsi, lorsqu'on jette dans le moule une cloche de grandes dimensions, les couches inférieures ne prennent pas exactement la même texture que les couches supérieures; il en est de même pour les canons, et l'on sait qu'il n'est pas indifférent de les jeter dans un moule horizontal ou vertical, ni de les forer en plaçant l'âme à la partie supérieure ou inférieure du cylindre de coulée.

De la fonte et de l'acier fondu. Il y a des corps qui semblent changer de nature par des fusions répétées, tels sont le laiton, la fonte et l'acier; mais on peut remarquer en général que ces modifications ne se montrent que dans les corps composés qui peuvent éprouver quelque altération dans les proportions de leurs principes constituans, soit par la haute température à laquelle ils sont soumis, soit par l'action des corps étrangers avec lesquels ils sont en contact. Ainsi, quand la fonte douce devient aigre par une seconde ou par une troisième fusion, il est probable que cet effet singulier ne tient pas seulement à des états d'agrégations différens, mais bien à des proportions variables de charbon que l'analyse chimique ne peut pas assigner. Il en est sans doute de même pour l'acier fondu, car nous avons remarqué, en parlant du damassé (page 44), que de très-petites différences dans les proportions du charbon pouvaient donner des états cristallins très-différens à l'œil.

Du fer. Il paraît que le fer du commerce le mieux purifié contient encore des traces de charbon, et comme dans cet état on éprouve déjà de grandes difficultés à le mettre en fusion, l'on peut conclure que du fer absolument pur serait excessivement difficile à fondre, surtout à cause de la nécessité où l'on serait d'éviter le contact de toutes les matières charbonneuses. Ce n'est donc pas par une fusion complète que l'on obtient le fer dans les arts, mais seulement par une fusion pâteuse qui donne aux molécules assez de liberté pour qu'elles puissent s'arranger et même former divers systèmes cristallins, très-perceptibles dans la cassure. Ce métal nous donne donc une nouvelle preuve que, même à l'état solide et sans liquéfaction, les mélocules peuvent se déplacer et s'agréger par leur affinité mutuelle, de manière à produire des cristaux plus ou moins volumineux. Car les martinets qui corroient le fer, et les cylindres qui le compriment pour en chasser les scories liquides, peuvent bien lui donner de la ténacité; mais à coup sûr ces forces mécaniques sont peu propres à déterminer les cristallisations régulières qu'on y observe souvent.

Du platine. Le platine en petites masses peut bien être fondu par l'action de la pile (350) ou par celle d'un chalumeau à gaz oxigène, mais il est si réfractaire que nos moyens les plus efficaces ne peuvent en fondre que des parcelles. Cependant on sait à présent l'obtenir en grande masse; on le passe à la filière, on le lamine, on le travaille au marteau pour en faire des fils, des tubes, des creusets, des cornues, des syphons, des chaudières et plusieurs autres instrumens qui sont d'une grande utilité dans la chimie et dans les arts. Toutes ces formes qu'il peut prendre supposent entre ses molécules une affinité puissante et une mobilité assez grande pour qu'elles puissent s'arranger sans que la masse soit liquefiée. Pour mieux faire comprendre cette vérité il suffit de rappeler en peu de mots la série des manipu-

lations que reçoit le platine pour être tiré du minerai et transformé en une masse solide.

D'abord on fait passer le minerai par une série de dissolutions qui ont pour objet de séparer le platine des nombreux métaux auxquels il est allié, et l'on arrive enfin à une dissolution qui ne contient plus que de l'hydrochlorate de platine et d'ammoniaque.

Ce sel double se précipite par l'évaporation en une poudre dont la couleur est un jaune orangé assez éclatant.

On l'expose à une haute température, et tout se vaporise, excepté le platine qui reste en masse spongieuse, plus friable que de la cendre agglomerée par le feu. C'est avec cette poussière sans consistance qu'il faut faire une masse solide et homogène.

Pour cela on la tasse dans des mortiers de fer, on la comprime pendant qu'elle est soumise à une haute température, et l'on obtient enfin une espèce de pâte que l'on achève de solidifier en la forgeant.

Il n'est sans doute pas nécessaire d'entrer dans de plus longs développemens sur les divers modes d'agrégation par lesquels peuvent passer les corps solides soumis à l'action du feu; l'art de la verrerie, la fabrication des porcelaines et des poteries, nous en offriraient encore une foule d'exemples. On pourra sur ce point consulter les observations intéressantes de M. Fleuriau de Belle-Vue, et de M. Dartigues sur la dévitrification du verre (*Journal de physique*), et celles de M. Mitscherlich sur des micas artificiels trouvés dans les scories des forges de Garpenberg (*Ann. de chimie*, t. 24, p. 69).

458. *Des propriétés que prennent les corps en se précipitant des dissolutions qui les contiennent.* S'il y a, comme nous venons de le voir, un grand nombre de corps solides que l'on peut obtenir par la fusion, ou en général par l'action du feu, il y en a beaucoup d'autres que l'on ne peut obtenir que par *la voie humide*, c'est-

à-dire par des liquides qui les prennent en dissolution et qui les laissent déposer par l'évaporation. C'est ainsi, par exemple, que le sel ordinaire se produit dans les marais salans par l'évaporation de l'eau de mer, et que le sucre solide se tire du suc de cannes par une évaporation convenablement ménagée. Les corps que l'on obtient par cette voie peuvent prendre des structures encore plus distinctes et plus variées dans leurs apparences que ceux que l'on obtient par le feu. Quand l'évaporation s'accomplit lentement dans un lieu tranquille, sans variations sensibles de température, le corps solide qui se dépose s'arrange en beaux cristaux parfaitement réguliers, transparens pour l'ordinaire, et terminés par de larges faces planes et polies; mais quand l'évaporation est très-rapide, le corps solide se précipite en poudre opaque, qui n'offre aucune trace de régularité ni d'agrégation. Entre ces deux extrêmes il est vrai de dire en général que le corps solide prend en se précipitant toutes les nuances de structure que l'on peut imaginer depuis l'état pulvérulent le plus informe jusqu'à l'état cristallin le plus parfait. Ainsi la pierre à bâtir ordinaire (*carbonate de chaux*) et le beau marbre blanc de Carrare ou de Paros, ne sont qu'une même substance qui a pris à son origine des états d'agrégation différens; le marbre lui-même n'est encore qu'une *cristallisation confuse*, car elle est sans transparence, et il y a bien des degrés intermédiaires entre sa structure et celle des cristaux limpides *du spath d'Islande*. Pareillement le charbon, la houille, le lignite, l'anthracite et le diamant ne sont qu'une seule et même substance diversement agrégée. Toutefois il y a cette différence entre ces deux exemples, que nous pouvons artificiellement produire des cristaux de chaux carbonatée, tandis que, jusqu'à présent, l'on n'a fait pour produire le diamant que des essais malheureux.

Les substances qui se déposent en cristallisant dans les

dissolutions aqueuses, se combinent ordinairement avec une certaine quantité d'eau qu'elles conservent à l'état sec, et que l'on appelle *l'eau de cristallisation*.

M. Haidinger avait observé, et M. Mitscherlich a confirmé récemment par un grand nombre de faits, cette vérité importante pour la cristallographie, qu'une même substance, en cristallisant à diverses températures, peut prendre des proportions variables d'eau de cristallisation et en même temps affecter des formes différentes.

Ainsi le sulfate de soude, qui est comme on sait plus soluble à 33° qu'à tout autre degré de chaleur moindre ou plus élevé, cristallise à cette température sans eau de cristallisation, tandis qu'à la température ordinaire il prend de l'eau et une tout autre forme.

Le séléniate de zinc peut prendre trois proportions d'eau et trois formes distinctes, suivant qu'on le fait cristalliser dans une dissolution chaude, dans une dissolution tempérée ou dans une dissolution convenablement refroidie.

Comme chaque forme primitive peut donner naissance à de nombreuses variétés de formes secondaires, on conçoit toutes les différences caractéristiques qu'une même substance peut offrir dans sa structure lorsqu'elle est ainsi obtenue par la voie humide, et toutes les différences encore plus tranchées qu'elle offrirait si l'on tenait compte des cristallisations confuses.

459. *Des fluides contenus dans les cavités des cristaux.* Plusieurs substances, et particulièrement le quartz cristallin, présentent dans leur intérieur des cavités fermées de toutes parts, ou des *geodes* qui sont presque remplies de liquide. Sir H. Davy et quelques autres observateurs ont essayé dans ces derniers temps de déterminer la nature de ces liquides, celle des gaz qui les accompagnent ordinairement et les pressions sous lesquelles ils se trouvent. On pouvait espérer que ces recherches fourniraient quel-

ques données importantes sur les circonstances qui ont déterminé la formation des geodes, et par conséquent la consolidation des substances dans lesquelles elles se trouvent. Mais jusqu'à présent les observations qui ont été faites sur ce sujet ne peuvent conduire à aucune conclusion décisive. Il résulte seulement des expériences de sir H. Davy : 1° Que les geodes sont assez hermétiquement fermées pour qu'on ne puisse rien y faire entrer, ni rien en faire sortir par des pressions mécaniques; 2° que le liquide qu'elles contiennent paraît être de l'eau assez pure pour ne donner aucun nuage dans le nitrate d'argent, ni dans d'autres réactifs; 3° que les fluides élastiques qui accompagnent l'eau ne sont autre chose que du gaz azote; 4° que dans cinq ou six geodes, ce gaz était à une pression sept ou huit fois moindre que la pression atmosphérique, et que dans une seule il s'est trouvé à une pression de deux ou trois atmosphères.

CHAPITRE III.

De l'élasticité.

460. Tous les corps sont élastiques, c'est-à-dire qu'ils peuvent tous, sans se rompre ou se désagréger, éprouver par des actions mécaniques quelques changemens dans leur structure, leur forme ou leur volume, et reprendre *exactement* leur état primitif dès que ces puissances mécaniques cessent d'agir sur eux. Nous avons déjà fait voir (233) que les volumes des gaz dépendent des pressions qu'ils supportent, et qu'à température égale ils reprennent toujours le même *volume* sous la même pression; cette propriété constitue une espèce d'élasticité que nous appellerons *élasticité de compression;* c'est la seule dont jouisse les gaz, et à peu près la seule aussi dont paraissent jouir les liquides. Les solides la possèdent comme les liquides et les gaz, mais en outre ils peuvent être fléchis ou allongés, et reprendre leurs dimensions ou leur *forme*, ce qui constitue *l'élasticité de tension;* enfin ces corps peuvent être plus ou moins tordus sans cesser de revenir à leur disposition ou plutôt à leur structure primitive, ce qui constitue *l'élasticité de torsion.* Nous allons successivement étudier ces diverses propriétés.

461. *Compressibilité des gaz.* La loi de Mariotte (233) n'avait été démontrée pour l'air que dans des limites assez restreintes; M. OErsted a essayé dernièrement de voir jusqu'à qu'elle pression elle peut s'étendre. L'une des plus grandes difficultés qui se présentent dans ce genre d'expérience, est de mesurer exactement les pressions qu'on exerce, car il n'y a pour cela que deux moyens : les

soupapes chargées de différens poids ou les diverses hauteurs d'une colonne liquide. M. OErsted a choisi le premier, et le roi de Danemarck a bien voulu favoriser l'importante entreprise de l'illustre savant de Copenhague, en lui confiant ses propres fusils à vent, avec leurs pompes et une très-bonne balance. Les capacités des réservoirs dans lesquels on comprimait l'air, étaient déterminées par le poids de l'eau qu'elles pouvaient contenir; les quantités d'air qu'on y accumulait avec les pompes étaient pareillement déterminées par des pesées; enfin les pressions étaient évaluées par les poids que des soupapes de dimensions bien connues pouvaient supporter avant de s'ouvrir de dehors en dedans. Par ces moyens M. OErsted a constaté que jusqu'à 60 atmosphères l'air reste soumis à la loi de Mariotte, c'est-à-dire que les volumes qu'il prend sont toujours en raison inverse des pressions qu'il supporte.

Ce résultat fondamental doit inspirer d'autant plus de confiance qu'il a été obtenu par un des plus habiles physiciens de notre temps.

Dans quelques autres expériences, M. OErsted avait poussé la pression jusqu'à 110 atmosphères (alors le réservoir contenait 101 grammes d'air); mais il paraît que la soupape éprouvait une espèce de flexion sous l'énorme poids dont il fallait alors la charger, et qu'elle n'était plus propre à donner des indications exactes.

Ainsi lorsqu'on ne dépasse pas 60 atmosphères, on peut en toute sécurité employer les manomètres à air pour mesurer les pressions. C'est le moyen que M. OErsted a proposé pour reconnaître si les gaz composés, et ceux qui se liquéfient aisément, suivent encore la loi de Mariotte dans leur compressibilité. Il en a même fait l'application au gaz sulfureux, qui se liquéfie à 3 atmosphères et demie, et il a constaté que ce gaz ne se comprime, suivant la loi de Mariotte, que jusqu'à 2 atm. 1/3 à peu près; passé ce terme, ses condensations deviennent de plus en plus ra-

pides, tellement qu'elles sont de 3,3, lorsque celles de l'air ne sont que de 3,2.

Ces expériences se disposent de la manière suivante : On prend deux tubes bien calibrés et à peu près de même dimension, l'un est rempli d'air sec, l'autre de gaz sulfureux pareillement sec, et on les renverse dans une petite capsule de mercure. Ce double manomètre est porté dans un tube de verre très-résistant, disposé verticalement, que l'on achève de remplir avec de l'eau ; c'est sur l'eau de ce tube que l'on exerce la pression par un moyen quelconque ; cette pression se communique au mercure et aux gaz, le manomètre à air en donne la mesure, et c'est par la comparaison de sa marche avec celle du manomètre voisin que l'on déduit la loi de condensation du gaz que celui-ci contient.

M. Despretz a employé le même appareil pour étendre les expériences de M. OErsted au cyanogène, à l'ammoniaque et à l'acide hydrosulfurique ; il a trouvé que ces gaz sont comme l'acide sulfureux plus compressibles que l'air ; ce résultat pris en général est très-probable, mais les valeurs numériques que donne M. Despretz sont sans doute inexactes, puisqu'elles supposent que l'air lui-même ne se comprime pas suivant la loi de Mariotte.

Arrivée au point où elle a été portée par M. OErsted, la question de la compressibilité des gaz devient une des plus intéressantes de la physique : il serait très-important de suivre au-delà de 60 atmosphères la compression des gaz simples, et de déterminer avec précision la marche des gaz composés ; car s'il est vrai, comme tout semble l'indiquer, que ceux-ci suivent une autre loi, il est extrêmement probable qu'ils suivraient aussi une autre loi de dilatation en les exposant à de très-hautes températures.

462. *De la compressibilité des liquides et de la chaleur qui en résulte.* C'est encore M. OErsted qui nous servira de guide en ce que nous avons à dire sur ce sujet : l'appareil

au moyen duquel il observe et mesure la compressibilité des liquides, est représenté dans les fig. 41 et 42 ; il se compose essentiellement d'un réservoir de compression *cc*, fait en verre épais, et d'un réservoir à tube capillaire *zz* que l'on peut, avec quelques physiciens, appeler un *piézomètre*. M. OErsted donne à peu près au piézomètre (*fig.* 42) la forme et les dimensions d'un gros thermomètre cylindrique; seulement le tube reste ouvert et se termine par un entonnoir ou par un petit renflement. Un point important pour l'exactitude de l'instrument, est de graduer ce tube en parties égales, dont la capacité soit une fraction connue de la capacité du cylindre; pour cela on détermine le poids du mercure contenu dans le cylindre, qui sera, par exemple, 1000 grammes, et le poids du mercure contenu dans une longueur donnée du tube, qui sera par exemple 2 décigrammes pour une longueur de 100 millimètres. Alors il est évident que la capacité correspondante à 1 millimètre du tube (supposé bien calibré) sera 0,000002 de la capacité du cylindre, et comme on peut lire aisément les demi-millimètres, soit sur le tube lui-même divisé au diamant, soit sur une échelle qui lui est adaptée, on pourra observer les millionièmes du volume primitif.

Supposons maintenant qu'on veuille employer ce piézomètre à déterminer la compressibilité de l'eau : on le remplit de ce liquide bien purgé d'air, et, par de légères variations de chaleur, on fait pénétrer dans le tube une petite colonne d'air, de mercure ou de carbure de soufre qui sépare et limite le volume d'eau sur lequel on veut opérer. Le piézomètre ainsi ajusté, on adapte à son échelle un petit manomètre à air *mm*, c'est-à-dire un tube cylindrique de 10 à 15 millimètres de diamètre, de 15 à 20 centimètres de longueur fermé en haut et ouvert en bas; on le porte dans le réservoir de compression préalablement rempli d'eau, comme il est représenté fig. 41, en prenant toutes les pré-

cautions nécessaires pour qu'il n'éprouve aucun changement sensible de température, car il ne faudrait peut-être qu'un demi-degré d'élévation pour repousser l'index dans l'entonnoir, et un ou deux degrés d'abaissement tout au plus pour le faire tomber dans le cylindre. Il reste à comprimer la grande masse d'eau du réservoir, afin qu'elle transmette sa pression au liquide contenu dans le piézomètre au moyen de l'ouverture de l'entonnoir *t*; pour cela on visse la pompe PP′ sur la forte virole en métal VV′ qui termine le réservoir en verre, et l'on serre fortement avec la clef F pour intercepter tous les joints. On voit en BB′ un tube par lequel on verse de l'eau jusqu'au piston S, et que l'on ferme ensuite; pendant ce temps-là, l'air s'échappe par l'ouverture latérale O, qui doit à son tour être fermée par le piston dès qu'il commence à descendre. Enfin cela fait, il suffit de tourner la traverse TT′ pour faire descendre dans son écrou la vis G, qui pousse le piston devant elle, et alors on observe en même temps le manomètre *mm′*, pour avoir la mesure de la pression, et l'index du piézomètre pour avoir la diminution de volume correspondante.

Voici maintenant les principaux résultats auxquels M. OErsted est arrivé :

1° Pour une pression de 1 atmosphère l'eau se comprime de 0,000045, c'est-à-dire des quarante-cinq millionièmes de son volume primitif ;

2° Jusqu'à 70 atmosphères, la compressibilité reste proportionnelle aux forces comprimantes, en sorte que si cette loi se soutenait indéfiniment, une pression de 100 atmosphères ne produirait qu'une diminution de 0,0045 dans le volume primitif, et il faudrait plus de 10,000 atmosphères pour le réduire à moitié ;

3° La compressibilité du mercure ne dépasse guère *un millionième* de son volume pour chaque atmosphère ;

4° Celle de l'alcool est de 20 millionièmes ;

5° Celle du sulfure de carbone de 30 millionièmes ;

6° Celle de l'éther sulfurique de 60 *id.*;

7° Celle de l'eau, contenant des sels, des alcalis ou des acides, est un peu moindre que celle de l'eau pure.

Ces nombres sont les résultats directs de l'expérience, mais il se présente ici une question fondamentale qui a été l'objet de plusieurs discussions entre les physiciens, et qui paraît enfin complétement résolue par les recherches de M. Poisson sur l'élasticité des corps. On demande si le piézomètre, dont l'enveloppe est comprimée entre le liquide extérieur et le liquide intérieur, n'éprouve pas un changement sensible de capacité qui nécessite une correction dans les observations directes. M. OErsted avait implicitement admis que cette correction pouvait être négligée; d'autres avaient pensé que l'enveloppe du piézomètre se comprime comme une simple plaque et qu'il en résulte une *augmentation de capacité*, dont il faut tenir compte; d'autres au contraire regardaient comme certain qu'un corps tout-à-fait solide de même forme et de même substance que le piézomètre, diminuant de volume par la compression, l'enveloppe seule doit diminuer exactement de la même quantité; qu'il en résulte par conséquent une *diminution de capacité* dont il faut corriger les résultats directs.

M. Poisson adopte cette dernière opinion, il en démontre la justesse comme nous le verrons (463), et de plus, il fait voir que si l'on représente par c la capacité primitive du piézomètre, cette capacité deviendra

$$c\left(1-\frac{3\delta}{2}\right)$$

sous la pression p:

δ étant la contraction qu'éprouverait dans sa longueur une tige de même substance que le piézomètre et supportant à ses deux bouts *seulement* la même pression p, rapportée à l'unité de surface.

Si au lieu de presser cette tige on la tirait dans sa longueur

avec le même effort, on admet en principe qu'elle prendrait le même allongement δ ; ainsi, d'après les expériences de MM. Colladon et Sturm, une baguette de verre s'allongeant de 11 dix millionièmes lorsqu'elle est tirée avec un effort égal à une atmosphère, c'est-à-dire avec un poids égal à celui d'une colonne de mercure de 760 millimètres de hauteur et d'une base égale à la section de la baguette, il en résulte que c étant la capacité d'un piézomètre de verre sous la pression ordinaire, cette capacité deviendra c $(1 - 0{,}00000165)$ sous une atmosphère de plus et c $(1 - 0{,}00000165\,n)$ sous un nombre n d'atmosphère de plus. On voit, d'après cette théorie, que toute l'exactitude des expériences de compressibilité repose sur la détermination précise de la contraction en volume ou de l'allongement linéaire de la substance qui compose l'enveloppe du piézomètre.

On trouvera réunis dans le tableau suivant les résultats de M. OErsted et ceux qui ont été obtenus par MM. Colladon et Sturm, dans le travail qui a été couronné par l'académie des sciences (*Ann. de chim*, 1827).

La 2e colonne contient les nombres donnés par les observateurs, et la 3e contient ces nombres corrigés d'après la formule précédente, en adoptant 11 dix millionièmes pour l'allongement linéaire du verre sous un poids équivalent à une atmosphère.

Cette correction augmente les nombres de M. OErsted, parce qu'il avait supposé la capacité du piézomètre constante, et elle diminue ceux de MM. Colladon et Sturm, parce qu'ils avaient supposé que la capacité augmente de $3\,\delta$ au lieu de $\frac{3\delta}{2}$.

Tableau de la compressibilité des liquides.

Noms des substances.	Compressibilités pour une atmosphère évaluées en millionièmes du volume primitif.	Compressibilités corrigées.
	M. OErsted.	
Mercure.	1	2,65
Alcool.	20	21,65
Sulfure de carbone. .	30	31,65
Eau.	45	46,65
Ether sulfurique. . .	60	61,65
	MM. Colladon et Sturm.	
Mercure.	5,03	3,38
Acide sulfurique. . .	32,	30,35
Acide nitrique. . . .	32,2	30,55
Ammoniaque.	34,7	33,05
Acide acétique. . . .	42,2	40,55
Eau non privée d'air.	49,5	47,85
Eau privée d'air. . . .	51,3	49,65
Ether nitrique. . . .	71,5	69,85
Essence de térébenth.	73,	71,35
Ether acétique. . . .	79,3	77,65
Ether hydrochlorique.	85,9 p. la 1re atm.	84,25
	82,25 p. la 9e atm.	80,60
Alcool.	96,5 p. la 1re atm.	94,95
	93,5 p. la 9e atm.	91,85
	89, p. la 24e atm.	87,35
Ether sulfurique à 0°.	133, p. la 1re atm.	131,35
	122, p. la 24e atm.	120,45
id. à 11°.	150, p. la 1re atm.	148,35
	141, p. la 24e atm.	139,35

On voit qu'en général les nombres de MM. Colladon et Sturm sont un peu plus forts que ceux de M. OErsted. La différence est faible pour le mercure et pour l'eau; mais elle est considérable pour l'éther sulfurique, et bien plus grande encore pour l'alcool. Ces deux derniers liquides et l'éther hydrochlorique donnent lieu à une observation importante, c'est que la compressibilité diminue à mesure que la pression augmente; enfin l'on remarque une augmentation très-sensible dans la compressibilité de l'éther sulfurique, depuis la température 0° jusqu'à la température de 11°.

La *chaleur* qui se dégage pendant la compression des liquides est toujours très-difficile à observer. M. OErsted n'a pas pu la rendre sensible. MM. Colladon et Sturm sont parvenus à faire marcher de 4 à 6° un thermomètre de Bréguet, en comprimant subitement l'éther sulfurique à grands coups de marteau. L'eau et l'alcool soumis à la même expérience n'ont produit aucune variation appréciable. Cependant comme des pressions de 30 à 36 atmosphères, produites un peu plus lentement que par le choc, faisaient marcher l'aiguille du thermomètre en sens contraire, on est forcé de supposer que la compression peut, indépendamment de toute chaleur, modifier la lame métallique qui forme les spires, et qu'en conséquence il ne faudrait pas se fier aux indications de cet instrument.

M. OErsted croyait avoir remarqué dans ses premières expériences que l'eau, plusieurs fois comprimée, perdait jusqu'à un certain point la propriété de revenir à son volume primitif; mais cette observation n'a point paru se confirmer par les expériences ultérieures. On peut donc admettre premièrement que les gaz et les liquides jouissent d'une *élasticité parfaite*; c'est-à-dire que les plus violentes pressions que l'on exerce sur eux, soit lentement, soit rapidement, sont toujours insuffisantes pour en altérer la structure d'une manière permanente, et que ces causes venant

à cesser, ces fluides reprennent identiquement leur volume primitif : secondement que l'enveloppe solide du piézomètre jouit aussi d'une *élasticité parfaite* dans les conditions sous lesquelles on a expérimenté jusqu'à présent ; car si elle se comprimait sensiblement d'une manière permanente, on n'obtiendrait pas sans doute les mêmes compressibilités avec un piézomètre neuf et un piézomètre qui aurait déjà été soumis à des pressions repétées.

463. *De la compressibilité des solides et de la résistance qu'ils opposent à l'écrasement.* — Il faut distinguer dans les solides la compressibilité permanente, et la compressibilité passagère qui disparaît avec la cause qui l'a produite. Nous avons vu dans le chapitre précédent que les métaux peuvent prendre par le travail une augmentation sensible de densité ; ainsi ils se compriment par le choc du marteau ou du balancier, ou par la pression du laminoir : mais cette compressibilité est une preuve de leur imparfaite élasticité, puisqu'ils conservent l'empreinte des forces auxquelles ils ont été soumis, même quand ces forces ont cessé d'agir. Si l'or et l'argent étaient des corps parfaitement élastiques on pourrait bien les graver, mais on ne pourrait pas les frapper en monnaies ou en médailles. Ces considérations s'appliquant à la plupart des corps solides, on peut en conclure que sous certaines conditions ils sont compressibles sans retour et imparfaitement élastiques. Quand les corps solides ont été comprimés comme nous venons de le supposer, on dit que leurs molécules ont été *forcées* et qu'elles ont pris un nouvel arrangement ; mais on admet en général qu'il y a pour chacun d'eux un certain degré de compression au-dessous duquel ils sont parfaitement élastiques et reviennent toujours à leur état primitif ; c'est cette dernière espèce de compressibilité qui nous occupera d'abord. Tout ce que l'on sait sur ce sujet délicat et important est dû aux recherches des géomètres ; nous allons choisir, parmi les résultats curieux

auxquels ils sont parvenus, ceux qui sont d'une utilité plus immédiate pour diriger les expérimentateurs; car, en cette matière, la théorie a devancé de beaucoup les expériences. (M. Poisson, *Mém. de l'Acad. des Sciences*, *Ann. de Chimie*, 1827 et 1828.)

Lorsqu'une sphère creuse, homogène et d'une épaisseur constante (*Fig.* 43), est soumise en dehors et en dedans à des pressions données, on détermine de la manière suivante les changemens qu'elle éprouve par l'effet de ces pressions.

Soit R la valeur primitive du rayon extérieur CR,

R' sa valeur après la compression,

r la valeur primitive du rayon intérieur cr,

r' sa valeur après la compression,

H la pression sur chaque unité de la surface extérieure,

h la pression sur chaque unité de la surface intérieure,

A une constante qui dépend de la nature de la substance, comme nous le verrons tout à l'heure:

On a ces relations.

$$R' = R\left\{1 - \frac{4(HR^3 - hr^3) + 5(H-h)r^3}{20A(R^3 - r^3)}\right\}$$

$$r' = r\left\{1 - \frac{4(HR^3 - hr^3) + 5(H-h)R^3}{20A(R^3 - r^3)}\right\}$$

1° Si la sphère creuse est également pressée en dehors et en dedans, on a $H = h$, et les valeurs de R' et r' se réduisent aux suivantes :

$$R' = R\left\{1 - \frac{H}{5A}\right\}$$

$$r' = r\left\{1 - \frac{H}{5A}\right\}$$

Ainsi, dans ce cas, le grand et le petit rayon éprouvent proportionnellement la même contraction, et cette contraction est en raison directe de la pression et en raison inverse de la constante A.

2° Pour déduire de ces formules ce qui arrive à une sphère pleine, il suffit de faire $r=0$; et l'on obtient alors:

$$R' = R\left\{1 - \frac{H}{5A}\right\}$$

D'où il suit que sous la même pression, une sphère creuse et une sphère pleine, de même matière, éprouvent des contractions égales.

3° Quand la pression intérieure est nulle on a $h=0$, et les valeurs de R' et r' deviennent

$$R' = R\left\{1 - \frac{H(4R^3+5r^3)}{20A(R^3-r^3)}\right\}$$

$$r' = r\left\{1 - \frac{9HR^3}{20A(R^3-r^3)}\right\}$$

Alors le rayon extérieur éprouve une contraction toujours plus petite que le rayon intérieur, et lorsqu'il est très-grand par rapport à celui-ci sa contraction n'en est que les $\frac{4}{9}$.

4° On peut toujours exercer à l'intérieur une pression telle que le rayon intérieur n'éprouve aucun changement; il suffit pour cela que le rapport de cette pression à la pression extérieure H soit le suivant:

$$\frac{h}{H} = \frac{9R^3}{5R^3+4r^3}$$

Le rapport des pressions qui produit cet effet dépend donc du rapport des rayons intérieurs et extérieurs. Quand on a par exemple $R=2r$, il suffit d'exercer en dedans une pression qui soit les 18/11 de la pression extérieure pour que le rayon intérieur n'éprouve aucun changement;

5° On peut aussi exercer des pressions, telles que le rayon extérieur R reste le même; il suffit pour cela que l'on ait

$$\frac{h}{H} = \frac{4R^3+5r^3}{9r3}$$

Par exemple, pour R=2r, on trouve

$$\frac{h}{H} = \frac{37}{9}$$

Ainsi, pour de tels rayons, il faudrait exercer en dedans une pression plus que quadruple de la pression extérieure pour que le rayon extérieur n'éprouvât pas de changement.

6° Si la cavité intérieure de cette enveloppe sphérique était remplie d'une substance homogène solide ou liquide pour laquelle la constante analogue à A eût une valeur A′ moindre ou plus grande que A, les valeurs des rayons extérieurs et intérieurs deviendraient après la compression :

$$R' = R\left\{1 - \frac{H(4A+5A')R^3 - 5H(A'-A)r^3}{5AD}\right\}$$

$$r' = r\left\{1 - \frac{9HR^3}{5D}\right\}$$

La valeur de D est :

$$D = A'(5R^3+4r^3) + 4A(R^3-r^3).$$

Or, la valeur de r' s'appliquant à la fois à la dernière couche intérieure de l'enveloppe Rr (*fig.* 43) et à la première couche extérieure du noyau cr, on voit en même temps la compressibilité qu'éprouve ce noyau; elle est dépendante de la constante A′, qui appartient à sa substance.

Si A′=A, il est facile de voir que le noyau se comprime, comme si la pression extérieure H lui était immédiatement appliquée. Ainsi une sphère liquide se comprime suivant les mêmes lois qu'une sphère solide, et même elle se comprime de la même quantité lorsque la constante A′ de sa substance est la même.

Si A′=0, on retombe sur les valeurs de R′ et r' que nous avions tout à l'heure pour h=0, ce qui doit être encore, puisqu'en supposant A′=0, c'est attribuer à la substance du rayon une compressibilité indéfinie et sans résistance.

Pour toutes les valeurs de A′ comprises entre 0 et A, les

valeurs de A′ et de r' sont comprises entre celles qui correspondent à $h=0$ et $h=H$; d'où il suit que le noyau est toujours moins comprimé que s'il avait reçu directement la pression H.

Enfin, si on a $A'>A$, les valeurs de R′ et r' deviennent analogues à ce qu'elles sont pour $h>H$; c'est à-dire que l'on peut toujours trouver une valeur de h supérieure à H, qui donnerait à R′ et à r' les mêmes valeurs que la supposition $A'>A$; et si l'on cherche alors l'effet que produirait la pression extérieure H en l'appliquant directement au noyau, on le trouverait toujours moindre que l'effet qu'elle produit par l'intermède de l'enveloppe solide. Ce résultat singulier peut se concevoir en observant que si le noyau est moins compressible que l'enveloppe sphérique, il empêche le rayon intérieur cr de prendre toute la diminution qu'il devrait prendre, et il agit alors comme une certaine pression intérieure plus grande que la pression extérieure. La limite de cet effet s'obtient en supposant $A'=\infty$, c'est-à-dire en supposant que le noyau est absolument incompressible: alors le rayon intérieur est constant; et comme on le rend constant aussi avec une pression $h=H\frac{9R^3}{5R^3+4r^3}$ il est évident que le noyau doit recevoir cette pression. Voilà comment il se trouve plus comprimé que s'il recevait directement la pression extérieure H.

Pour vérifier par l'expérience ces déductions de la théorie, il faut pouvoir déterminer la valeur de la constante A qui caractérise chaque substance par rapport à sa compressibilité. M. Poisson donne pour cela la formule suivante,

$$A=\frac{2L}{5as}\left(P+\frac{P'}{2}\right)$$

qui est d'une application facile pour les substances qui peuvent être reduites en fils ou en tiges. Car, si l'on fait un fil dont la longueur soit L, le poids P′, la section s, et qu'a-

près l'avoir fixé verticalement par son extrémité supérieure on le charge à son extrémité inférieure d'un poids P, puis qu'on observe l'allongement a qu'il éprouve, il suffira de substituer toutes ces données dans la formule pour avoir la valeur de A.

Comme on admet en principe dans toute cette théorie que la compressibilité qui est produite par certaines forces est toujours égale à l'extensibilité qui serait produite par les mêmes forces, agissant de la même manière et en sens contraire, on voit que la formule précédente pourrait donner aussi la valeur de A au moyen de la compressibilité. Car, en négligeant $\frac{P'}{2}$, qui sera toujours très-petit par rapport à P, et en supposant que le poids P comprime la tige dans le sens de sa longueur, et que a désigne alors la contraction, l'on aura :

$$A = \frac{2LP}{5as}$$

Le poids P s'exerçant sur la surface s, il en résulte que la pression H sur l'unité de surface est $H = \frac{P}{s}$, et en faisant aussi $L = 1$ on a :

$$A = \frac{2H}{5a}$$

Cette formule établit une relation remarquable entre la contraction a qu'éprouve une tige pressée par ses bouts et libre par son contour, et celle qu'éprouve une sphère de même substance supportant la même pression H sur toute sa surface ; car nous avons trouvé pour ce dernier cas

$$R' = R\left(1 - \frac{H}{5A}\right)$$

qui devient, par la substitution de A,

$$R' = R\left(1 - \frac{a}{2}\right)$$

Ce qui fait voir que la contraction qu'éprouve une tige pressée seulement par ses bouts, est double de celle qu'éprouve la même tige pressée avec la même force sur tous les points de sa surface.

Le volume de la sphère comprimée est sensiblement $v\left(1-\frac{3a}{2}\right)$, v étant son volume primitif. D'où il suit enfin que, si l'on connaît l'*allongement linéaire* a d'une substance tirée à ses bouts par une certaine force, il en faudra prendre la moitié pour avoir la contraction linéaire de cette même substance pressée sur tous ses points par la même force, et les $\frac{3}{2}$ pour avoir sa contraction de volume. C'est d'après ces principes que nous avons corrigé précédemment les observations piézométriques.

En comprimant les solides au-delà les limites de leur parfaite élasticité, ils restent plus ou moins comprimés et prennent des densités croissantes, qui ont été jusqu'à présent très-peu étudiées. Si la compression continuait indéfiniment sans cesser d'être égale sur tous les points de la surface, il paraît qu'à la fin la plupart des solides se briseraient en poussière; mais quand les pressions sont inégales, il ne faut pas de grands efforts pour *écraser* les substances les plus résistantes. Comme il est souvent utile, soit pour les recherches physiques, soit pour les applications des arts, d'avoir quelques données sur ces propriétés des solides, nous avons rassemblé dans le tableau suivant plusieurs résultats qui ont été obtenus par M. Rondelet et par M. G. Rennie. Ils sont extraits de l'ouvrage de M. Navier (*Résumé des leçons données à l'École royale des ponts et chaussées*).

Résistance des pierres à l'écrasement, d'après les expériences de M. Rondelet, *sur des cubes de* 5 *centimètres de côté.*

Indication des pierres.	Densités.	Poids produisant l'écrasement.
		kilogrammes.
Basalte d'Auvergne.	2,88	51945
Grès blanc	2,48	23086
Marbre noir de Flandre.	2,72	19719
Granit de Normandie, dit *gatinos*. . .	2,66	17555
Granit gris de Bretagne.	2,74	16353
Pierre noire de Saint-Fortunat employée à Lyon, très-dure et coquilleuse. . .	2,65	15668
Granit vert des Vosges.	2,85	15487
Liais de Bagneux, près de Paris, très-dur, d'un grain fin.	2,44	11113
Marbre blanc statuaire.	2,69	8176
Roche d'Arcueil, près de Paris.	2,08	6334
Roche de Chatillon, près de Paris, dure, un peu coquilleuse..	2,29	4347
Pierre de Saillancourt, près de Pontoise, 1re qualité.	2,41	3536
2e qualité.	2,29	2994
3e qualité.	2,10	2304
Pierre ferme de Conflans employée à Paris.	2,07	2245
Pierre à plâtre de Montmartre, près de Paris.	1,92	1785
Vergelée des environs de Paris, tendre, d'un grain grossier, résistant à l'eau.	1,33	1496
Pierre tendre ou lambourde de Conflans, 1re qualité.	1,82	1407
Lambourde de qualité inférieure, tendre, résistant mal à l'humidité. . . .	1,56	575
Grès tendre.	2,49	98

Résistance des bois à l'écrasement, d'après les expériences de M. G. Rennie, *sur des cubes de* 1 *pouce anglais de côté.*

Bois.	Poids produisant l'écrasement en livres avoir du poids.
Chêne anglais.	3860
Sapin blanc.	1928
Pin d'Amérique.	1606
Orme.	1284

Résistance des métaux à l'écrasement, d'après les expériences de M. G. Rennie, *sur des cubes de* 1/4 *de pouce anglais de côté.*

Métaux.	Densités.	Poids produisant l'écrasement en liv. av. du poids.
Fer tiré du centre d'une large masse	7,033	9773
Fer tiré de barres coulées horizontalement.	7,113	10114
Fer tiré de barres coulées verticalement.	7,074	11137
Cuivre coulé.	»	7318

La livre *avoir du poids* vaut en kilogrammes $0_k,45355$, et le pouce anglais vaut $25^{mm},3999$.

Il serait facile avec ces données de calculer la hauteur qu'il faudrait donner à une colonne pour que sa base fût écrasée par son poids. On trouverait, par exemple, pour le basalte d'Auvergne, une hauteur de 7215 mètres, c'est-à-dire environ deux lieues. Ainsi on en pourrait conclure qu'une montagne cylindrique de basalte se briserait par son poids si elle avait deux lieues de hauteur, depuis son sommet jusqu'au sol; mais au-dessous du sol les pressions latérales soutiennent une partie de la charge.

464. *De l'élasticité de tension et de la ténacité.*—Les corps solides travaillés en fils, en tiges ou en barres, éprouvent divers phénomènes lorsqu'ils sont tirés dans le sens de leur axe par des forces successivement croissantes : 1° leur longueur

augmente et leur diamètre diminue ; 2° ils reviennent exactement à leurs dimensions primitives quand les forces tractives viennent à cesser sans avoir dépassé certaines limites ; 3° au-delà de ces limites ils restent allongés dans un sens et rétrécis dans l'autre ; 4° pour des forces plus grandes encore ils se rompent, tantôt brusquement dans toute leur largeur, tantôt lentement en s'amincissant de plus en plus.

1° Il est naturel de supposer que pendant la traction le volume du corps augmente à peu près comme il diminue pendant la compression. C'est, en effet, ce que M. Cagniard La Tour a observé en étirant un fil de cuivre dans un long tube rempli d'eau et convenablement disposé ; et M. Poisson a démontré que, si l'on représente en général par a l'allongement que prend par la traction un cylindre dont la longueur est l'unité, le rétrécissement dans le sens perpendiculaire à l'axe sera seulement $\frac{a}{4}$. De telle sorte que le volume primitif étant v, le volume pendant la traction sera

$$v\left(1+\frac{a}{2}\right)$$

2° C'est, je crois, S'gravesande qui a le premier établi les lois fondamentales de l'élasticité de tension des fils. L'appareil dont il se servait repose sur les principes suivans : le fil est tendu horizontalement entre deux points fixes F et F′ (*Fig.* 44) ; vers son milieu on pose un petit plateau de balance au moyen d'un crochet C ; mais pour que ce premier poids ne donne aucune flexion au fil, on l'équilibre au moyen d'un contre-poids soutenu par un fil de soie et passant sur une petite poulie p, au centre de laquelle est fixée une aiguille G. Cela fait, on observe la position de l'aiguille sur le cadran divisé D G D′, et l'on commence à mettre doucement des charges successives dans le plateau du crochet ; le fil se tend et se courbe de plus en plus ; il en résulte une

flèche H H′, dont on détermine la longueur par le nombre des divisions que l'aiguille a parcourues, et il suffit alors de calculer les triangles F H H′ et F′ H H′ pour en déduire la longueur actuelle F H′ F′ du fil. Quant à la tension qu'il éprouve, on la déduit, par les règles ordinaires de la mécanique, des poids additionnels dont on a chargé le plateau, en tenant compte s'il est nécessaire du poids du fil lui-même. Au moyen de cet appareil S'Gravesande a démontré d'abord que l'élasticité de tension est parfaite entre certaines limites dans les fils et dans les lames ; car ils reviennent exactement dès que la force de traction est supprimée, et ensuite il a reconnu qu'entre ces limites *les allongemens sont proportionnels aux forces de traction.*

3° Les fils qui ont été *forcés*, c'est-à-dire qui ont conservé une partie de l'allongement qu'ils avaient reçu par la traction, ne cessent pas pour cela d'être élastiques. Ce nouvel état est analogue à l'état primitif, et ils y reviennent aussi entre certaines limites. Il ne faut pas s'étonner d'après cela, que dans un même fil on trouve des parties plus ou moins élastiques et plus ou moins denses.

4° La ténacité des corps est la résistance qu'ils opposent à la rupture lorsqu'ils sont tirés dans le sens de leur longueur. Soit s, le nombre des millimètres carrés de la section perpendiculaire à l'axe d'un fil, d'une tige, ou en général d'un corps prismatique ; soit K, le nombre des kilogrammes nécessaires pour produire la rupture par la traction. En admettant que l'effort se partage également entre tous les millimètres carrés de la section s, il est évident que $\frac{K}{s}$ sera l'effort supporté par 1 millimètre carré ; c'est en général cette expression que l'on prend pour la mesure de la ténacité. Ainsi une substance aura une ténacité double d'une autre quand la valeur de $\frac{K}{s}$ sera pour la première double de ce qu'elle est pour la seconde.

Ténacité de diverses substances, ou nombre de kilogrammes que supporte 1 millimètre carré.

Noms des substances.		Ténacité moyenne.	Noms des observateurs.
			MM.
Fer en fil, non recuit. . . .	50 à 87. . . .	68	Seguin aîné.
N° 1 à 23 (Franche-Comté).			
Fer en fil, non recuit. . . .	50 à 84. . . .	67	Dufour.
N° 4 à 19 (Ferrière, St-Gingolf).			
Fer en fil (Bourgogne).		60	Buffon.
Fer en fil (anglais).		64	Telford.
Fer en fil, recuit.	36 à 44 envir.	40	
Fer en barres carrées ou rectangulaires	30 à 60.	45	Seguin aîné.
Id.	32 à 56.	43	Peronnet.
Id.		47	Soufflot et Rondelet.
Id. (anglais).		46	Telford.
Fer fondu.		14	Brown.
Fer fondu horizontalement.		13	G. Rennie.
Fer fondu verticalement.		14	*Id.*
Barres d'acier *blistered* (anglais).		28	Brown.
Id. fondu *Id.*		44	*Id.*
Tôle dans le sens du laminage	36 à 45	41	Navier.
Id. perpendiculairement au laminage.	33 à 39	36	*Id.*
Laiton en fil, non recuit. . .	40 à 80	60	Dufour.
Id. . . . . . recuit. . .	20 à 40 envir.	30	*Id.*
Cuivre rouge laminé.		21	Navier.
Plomb laminé.		1,35	*Id.*
Verre, en tige ou en tube.	1,7 à 3,3 . . .	2,5	*Id.*

On voit sur les fils de fer et de laiton que le recuit diminue singulièrement la ténacité, puisqu'il la réduit presque à moitié. Les tableaux complets de M. Seguin font voir aussi que la ténacité des fils augmente à mesure que leurs diamètres diminuent, à moins qu'ils ne deviennent

trop fins : ces deux circonstances sont sans doute liées entre elles.

465. *De la résistance du corps à la flexion.*—Lorsqu'on fléchit un corps dans les limites de son élasticité, il reprend exactement sa forme dès que la cause a cessé. Pendant la flexion, il éprouve à la fois une *traction* et une *compression*; car toutes les fibres ou tous les filets que l'on peut alors concevoir sur la surface convexe sont évidemment allongés, tandis qu'ils sont sur la surface concave raccourcis ou comprimés, et il faut nécessairement qu'il s'en trouve entre ces deux positions qui n'éprouvent ni allongement ni contraction. C'est ce que l'on voit (*Fig.* 45) sur le cylindre AB, *encastré* par son extrémité A, et tiré par un poids à son extrémité B. Les filets *ab* sont allongés, les filets $a'b'$ sont accourcis, et les filets qui conservent leur longueur forment une certaine surface, telle que *pqrs*. C'est donc en vertu de la double élasticité de tension et de compression que le cylindre AB se redresse quand on supprime le poids P. Ce que nous disons ici d'un cylindre s'étend à un corps prismatique quelconque, ou *encastré* ou posé sur *deux appuis*. Mais l'on n'a fait sur ce sujet que des recherches pratiques pour connaître la force des matériaux de construction ou des recherches mathématiques, dont nous ne pouvons rendre compte ici (*voyez* l'ouvrage de M. Navier). Nous devons donc nous borner à rappeler ce sujet à l'attention des physiciens : en l'étudiant par la voie de l'expérience on parviendra sans doute à déterminer d'une manière plus sûre et plus facile le coefficient d'élasticité de tension et celui d'élasticité de compression, à faire voir directement s'ils sont égaux comme on le suppose ou s'ils peuvent différer sous certaines conditions ; et l'on pourra au moins vérifier plusieurs résultats importans qu'il serait difficile de soumettre à l'épreuve par d'autres moyens.

466. *De la résistance des vases.*—Pour prendre une idée de l'effet que produisent les liquides sur les parois des

vases, concevons un anneau ATBC (*fig.* 46) ou plutôt un fil flexible dont tous les points soient pressés de dedans en dehors par des forces égales CA, CT, etc. S'il est élastique, il est évident que toutes ces forces normales tendront à l'étendre d'abord et ensuite à le rompre ; ainsi elles se transforment en forces *tangentielles*, telles que TF et TF′, qui agissent directement pour séparer la substance comme une traction agit dans le sens de la longueur d'un fil pour en opérer la rupture. On démontre en mécanique les lois suivant lesquelles s'accomplit cette transformation de forces normales en forces tangentes, et l'on arrive à cette conséquence, sur laquelle nous allons nous appuyer : que la tension T, qui s'exerce suivant les tangentes TF, TF′, est égale à la pression normale P qui s'exerce suivant CA, CT, etc., multipliée par le rayon R de l'anneau ; c'est ce qui est exprimé par l'équation

$$T = PR.$$

Si nous considérons maintenant un tuyau cylindrique horizontal, rempli d'un liquide qui s'écoule sous une pression quelconque, chacune de ses sections perpendiculaires éprouve des pressions normales comme l'anneau dont nous venons de parler, et il en résulte aussi une tension ou un effort qui tend à rompre ses parois parallèlement à l'axe. On aura donc

$$T = PR;$$

T étant la tension, P la pression sur l'unité de surface ou sur 1 millimètre carré, et R le demi-diamètre du tuyau, évalué aussi en millimètres.

Les parois n'éprouvent aucune pression dans le sens de la longueur, si nous supposons que le liquide s'écoule librement par les deux bouts.

Soit E l'épaisseur du tuyau en millimètres, et T′ la ténacité de sa substance pour 1 millimètre carré ; on aura T′E pour le nombre des kilogrammes que pourrait suppor-

ter sans se rompre une tranche du tuyau perpendiculaire à l'axe et d'un millimètre de longueur. Il faudra donc que la tension T, qu'il éprouve, soit tout au plus égale à $T'E$. Ce qui donne

$$T = T'E,$$

et en vertu de l'équation précédente

$$T'E = PR;$$

d'où. . . . . $E = \frac{PR}{T'}$.

C'est l'épaisseur qu'il faut donner à un tuyau pour qu'il soit à la limite de ce qu'il peut supporter sans éclater. Ainsi cette épaisseur est en raison directe de la pression intérieure et du rayon, mais en raison inverse de la ténacité.

Pour prendre un exemple, nous chercherons sous quelle pression doit se rompre un tuyau de plomb de 5 millimètres d'épaisseur et de 25 millimètres de rayon intérieur, la ténacité du plomb étant, comme nous avons vu, $1^k,35$.

On trouve en faisant le calcul $P = 0^k,27$.

Or, une atmosphère exerçant une pression de $0^k,01$ sur un millimètre carré, il en résulte que le tuyau pourra supporter 27 atmosphères. M. Jardine d'Edimbourg a en effet trouvé qu'un tuyau de plomb ayant à peu près les dimensions précédentes supportait, sans altération apparente, une pression de 800 pieds d'eau, c'est-à-dire environ 24 atmosphères et demie, et qu'il éclatait sous 1000 pieds (anglais), c'est-à-dire sous 30 atmosphères environ. Si le diamètre du tuyau eût été double il n'aurait pu supporter que 15 atmosphères.

Dans les tuyaux fermés par les deux bouts les pressions que supportent les bases terminales produisent une traction sur la longueur, et il est facile de voir que cette traction, rapportée à l'unité de surface, est $\frac{PR}{2}$, ou la

moitié seulement de celle qui agit pour faire éclater le tuyau parallèlement à l'axe.

Par la même raison, la tension qui s'exerce sur chaque unité de surface dans un vase sphérique est aussi $\frac{PR}{2}$, et la relation qui existe entre la pression limite P, l'épaisseur E, le rayon R et la tenacité T′ est alors

$$E = \frac{PR}{2T'}$$

La moindre ténacité de la tôle étant de $36^k,4$ par millimètre carré, on voit qu'une sphère, de 168 millimètr. de diamètre, faite avec de la tôle de 2,6 d'épaisseur, doit éclater quand la pression P est de $1^k,13$ par millimèt. carré; c'est-à-dire environ 113 atmosphères. M. Navier a en effet trouvé qu'une sphère de très-bonne tôle ayant les dimensions précédentes a éclaté sous 140 atmosphères; la ténacité de sa substance était sans doute un peu plus grande que 36,4.

Nous nous bornerons à ces exemples. On trouvera dans l'ouvrage de M. Navier une théorie complète de la résistance des vases, fondée sur des considérations très-simples et très-ingénieuses.

467. *De l'élasticité de torsion.* La facilité avec laquelle les fils fins de métal peuvent être tordus, et la régularité parfaite avec laquelle ils reviennent sur eux-mêmes pour reprendre leur position primitive, ont conduit les physiciens à plusieurs découvertes importantes.

C'est Coulomb qui a le premier observé cette propriété avec l'attention qu'elle mérite, et c'est lui aussi qui en a fait le premier les applications les plus heureuses, en déterminant, dans sa balance de torsion, les lois fondamentales des fluides électriques et magnétiques (312 et 371). Quelques années plus tard, Cavendish parvint de son côté à un résultat plus extraordinaire encore, puisqu'il détermina la densité et par suite le poids de la terre au moyen de la

torsion d'un petit fil d'argent de quelques décimètres de longueur et de quelques centièmes de millimètres de diamètre (58).

Avant de rapporter les lois expérimentales de la torsion, telles que Coulomb les a observées dans la soie, les cheveux et les fils fins de métal, nous décrirons l'appareil dont on peut se servir pour ces recherches délicates (*Fig.* 47).

P P′, pied de l'appareil portant trois vis calantes.

T T′, tube vertical de laiton très-résistant.

c c′, curseur inférieur terminé en c′ par un disque qui peut être divisé en degrés, ou sur lequel on adapte une division circulaire.

s s′, Curseur supérieur terminé en s′ par une pince au moyen de laquelle on fixe l'extrémité du fil.

N N′, pince qui arrête l'extrémité inférieure du fil, et peut se visser sur des cylindres de différens poids ou de différens rayons. Ces cylindres peuvent être en métal lorsqu'on fait les expériences sur des fils de métal, mais pour la soie ou les cheveux, il convient qu'ils soient en bois ou en ivoire.

Voici maintenant les lois générales que l'on peut constater par l'expérience.

1° *En chargeant un fil de différens poids il s'arrête en général dans des positions de stabilité différentes.*

Quelquefois cette variation peut s'étendre jusqu'à une demi-circonférence, ou même jusqu'à une circonférence entière.

Pour constater ce résultat, on adapte à la pince inférieure une espèce de petit plateau de balance dans lequel on ajoute des poids successifs, en notant à chaque fois la position d'un point de repaire à l'égard de la circonférence divisée du disque c′ dont le centre est sur le prolongement du fil. Un assemblage de plusieurs fils présente le même phénomène; ainsi, quand on suspend, par exemple, une

aiguille aimantée à un faisceau de soie plate, il importe de trouver d'avance la position d'équilibre de ce fil composé en y suspendant un poids égal à celui de l'aiguille aimantée qu'il doit porter. Un poids plus fort ou plus faible lui donnerait une torsion qui pourrait probablement exercer une influence sensible sur l'amplitude des variations diurnes.

2° *Les oscillations du fil sont isochrones.*

C'est-à-dire qu'elles s'accomplissent toutes dans le même temps, quelle que soit leur amplitude, pourvu toutefois que cette amplitude ne dépasse pas une certaine limite qui dépend de la nature et de la longueur du fil. Par exemple, pour un fil de fer de 9 pouces de longueur et d'un diamètre tel que 6 pieds de longueur ne pèsent que 5 grains, les oscillations sont très-sensiblement isochrones quand leur amplitude ne dépasse pas une demi-circonférence; mais si l'écart primitif était de 3 circonférences entières, il en résulterait des oscillations de 6 circonférences qui seraient plus lentes que les premières d'environ 1/20 ou 1/30. Dans tout ce qui va suivre, nous ne parlerons que des oscillations *très-petites* c'est-à-dire *isochrones*.

Pour vérifier par l'expérience cette loi de l'isochronisme, on se sert de l'appareil précédent, (*Fig.* 46), on attache le fil à la pince supérieure, on le charge d'un poids de forme cylindrique assez fort pour le *tendre* et trop faible pour l'*étirer*, et quand l'équilibre est bien établi, on tourne le cylindre de 50, de 100 ou même de 180°, avec la précaution de le maintenir dans son axe, qui est aussi l'axe du fil; ensuite on l'abandonne à lui-même; les oscillations commencent, on les compte à partir d'un instant donné, au moyen d'un repaire ou d'un index qui est adapté au cylindre, et l'on mesure le temps avec une bonne montre à secondes.

On démontre par les principes de la mécanique, que les oscillations étant isochrones, il faut nécessairement que

la force de torsion qui les produit soit proportionnelle à l'angle de torsion. Cette vérité fondamentale pourrait aussi se démontrer directement par l'expérience : il suffirait pour cela de remarquer que la force avec laquelle le magnétisme de la terre tend à ramener une aiguille aimantée dans le méridien magnétique, est évidemment proportionnelle au sinus de l'angle que cette aiguille fait avec le méridien, ou à l'angle lui-même s'il ne dépasse pas 8 ou 10°. Ainsi, une aiguille aimantée horizontale étant en repos dans la balance de torsion, et bien dirigée dans le plan du méridien magnétique (n° 312), il faudra pour l'en écarter de 3° par exemple, tourner le micromètre supérieur de 47°, et le tourner de 94 pour l'en écarter de 6°. Dans le 1er cas, l'angle de torsion est de 47—3=44°, et dans le 2e cas, il est de 94—6=88. Mais la seconde force de torsion doit être double de la première puisqu'elle balance une force magnétique dont l'effet est double. Donc la force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion.

3° *Les durées des oscillations sont entre elles comme les racines carrées des poids qui tendent le fil.*

Cette vérité ne peut être constatée avec une grande exactitude, que sur les fils qui ont en même temps assez de souplesse pour être tendus par un poids très-faible, et assez de ténacité pour supporter un poids considérable sans être *étirés*. Car on peut alors, entre ces deux limites, prendre des poids qui soient entre eux, par exemple, comme les nombres 1, 4, 9, 16, 25, et reconnaître par des oscillations analogues aux précédentes, que les durées des oscillations sont entre elles comme les nombres 1, 2, 3, 4, 5, etc.

Il est à peine nécesssaire d'ajouter que tous ces poids divers doivent être essentiellement des cylindres de même rayon, ayant aussi des surfaces également polies.

On démontre par les principes de mécanique, que cette 3 loi ne peut subsister qu'autant *que la force de torsion d'un*

fil reste exactement la même sous les différens poids qui le tendent.

4° *Les durées des oscillations sont entre elles comme les racines carrées des longueurs du fil.*

C'est-à-dire, que si l'on prend diverses longueurs d'un même fil, qu'on les ajuste successivement à l'appareil (*Fig.* 46), de manière que les longueurs comprises entre les deux pinces soient entre elles comme les nombres 1, 4, 9, 16, 25, etc., et qu'on les fasse osciller après les avoir chargées du même poids, les durées des oscillations seront entre elles comme les nombres 1, 2, 3, 4, 5, etc.

Puisque la durée des oscillations augmente avec la longueur du fil, il est évident que la force de torsion diminue, et l'on démontre théoriquement qu'elle diminue comme la longueur du fil augmente, car cette hypothèse est la seule qui reproduise la loi expérimentale précédente.

Au reste, on peut se rendre compte de cette vérité théorique en observant que, pour un même angle de torsion, l'écartement des molécules est véritablement réduit à la moitié quand la longueur du fil est double, au tiers quand elle est triple, etc., et qu'il est tout simple que la force de torsion soit alors réduite à la moitié, au tiers, etc., puisque cela prouve seulement qu'elle est proportionnelle à l'écartement des molécules, comme on pourrait le supposer *a priori.*

5° *Les durées des oscillations sont en raison inverse des carrés des diamètres des fils.*

C'est-à-dire que si l'on prend successivement des fils de *même substance* et de *même longueur*, dont les diamètres soient entre eux comme les nombres 1, 2, 3, 4, et qu'on les fasse osciller après les avoir chargés des *mêmes poids*, es durées des oscillations seront entre elles en raison inverse des nombres 1, 4, 9, 16, etc.

On en conclut par la théorie que les forces de torsion

sont entre elles comme les quatrièmes puissances des diamètres des fils, car les forces de torsion sont en raison inverse des carrés des temps d'une oscillation.

468. Après avoir rapporté les lois expérimentales de la torsion et les avoir rapprochées des lois théoriques auxquelles elles se trouvent nécessairement liées, il n'est peut-être pas inutile de donner ici la formule générale qui comprend tous ces résultats. Cette formule est la suivante ;

$$T^2 = \frac{\pi^2 P R^2}{2gF}$$

π, rapport approché de la circonférence au diamètre 3,141592.

g, gravité, à Paris, ou $9^m,8088$, en prenant le mètre pour unité de longueur, et la seconde sexagésimale pour unité de temps.

T, durée d'une oscillation évaluée en secondes.

P, poids cylindrique qui tend le fil.

R, rayon du cylindre dont le poids est P, il doit être évalué en mètres.

F, force de torsion du fil, c'est-à-dire l'effort qu'il faudrait exercer à l'extrémité d'un levier d'un mètre de longueur pour le maintenir tordu d'un arc dont la valeur rectiligne serait aussi un mètre en le comptant sur une circonférence d'un mètre de rayon. Ainsi la force de torsion est exprimée par un poids, et elle est évaluée en grammes ou en kilogrammes, suivant que l'on a évalué le poids P au moyen de l'une ou l'autre de ces unités.

Cette formule peut servir à calculer la valeur absolue de la force de torsion, et à mettre en évidence les différens rapports qui existent entre cette force et la durée des oscillations, leur amplitude, le poids cylindrique qui tord le fil et son rayon.

Par exemple, dans une expérience de Coulomb sur un

fil de fer n° 12, dont le mètre de longueur pesait 159 milligrammes, on avait

$$T = 12'',1 ; \quad P = 979{,}012^{\text{grammes}} ; \quad R = 0{,}02143^{\text{mètres}}.$$

La longueur du fil était seulement de $0^m{,}0203$.

On trouve au moyen de ces données, que sa force de torsion était telle, que pour le maintenir tordu d'une circonférence entière, il aurait fallu exercer un effort de $0{,}^{gr}00968$, ou d'environ 1 centigramme, à l'extrémité d'un bras de levier de 1 mètre de longueur.

La formule précédente s'obtient, en supposant que la force de torsion est proportionnelle à l'angle de torsion, et comme elle exprime que la durée des oscillations est indépendante de l'amplitude, on en conclut réciproquement que l'expérience indiquant l'isochronisme des oscillations, il faut que la force de torsion soit proportionnelle à l'angle de torsion.

Pour le même fil tendu par des poids cylindriques P et P′, de même rayon, on aurait

$$T^2 = \frac{\pi^2 P R^2}{2gF} \text{ et } T'^2 = \frac{\pi^2 P' R^2}{2gF'}$$

Et puisque l'expérience donne

$$\frac{T^2}{T'^2} = \frac{P}{P'} \text{ ou } \frac{T}{T'} = \sqrt{\frac{P}{P'}}$$

On en conclut $F = F'$; c'est-à-dire que les forces de torsion d'un fil sont indépendantes des poids qui le tendent.

Pour des longueurs inégales du même fil tendues par le même poids, on aurait

$$T^2 = \frac{\pi^2 P R^2}{2gF} \text{ et } T'^2 = \frac{\pi^2 P R^2}{2gF'}$$

$$\text{ou } \frac{T^2}{T'^2} = \frac{F'}{F}$$

Et puisque l'expérience donne

$$\frac{T^2}{T'^2} = \frac{L}{L'} \text{ ou } \frac{T}{T'} = \sqrt{\frac{L}{L'}}$$

L et L′ étant deux longueurs différentes du même fil, on en conclut

$$\frac{F'}{F} = \frac{L}{L'}$$

C'est-à-dire que les forces de torsion sont en raison inverse des longueurs.

Enfin, deux fils de *même substance* et de *différens diamètres* D et D′ étant tendus par le *même poids*, on aurait

$$\frac{T^2}{T'^2} = \frac{F'}{F}$$

Et comme l'expérience donne

$$\frac{T}{T'} = \frac{D^2}{D'^2} \text{ ou } \frac{T^2}{T'^2} = \frac{D^4}{D'^4}$$

On en conclut

$$\frac{F'}{F} = \frac{D^4}{D'^4}$$

C'est-à-dire que les forces de torsion sont en raison inverse des quatrièmes puissances des diamètres.

On peut remarquer encore que si le même fil était tendu successivemement par deux poids égaux, mais de rayons différens R et R′, on aurait

$$T^2 = \frac{\pi^2 P R^2}{2gF} \qquad T'^2 = \frac{\pi^2 P R'^2}{2gF}$$

d'où $\frac{T^2}{T'^2} = \frac{R^2}{R'^2}$ ou $\frac{T}{T'} = \frac{R}{R'}$

C'est-à-dire que, dans ces circonstances, les durées des oscillations sont proportionnelles aux rayons des poids qui tendent le fil.

469. Toutes ces lois sont sans doute restreintes aux cas où les fils ont des dimensions assez petites pour que les actions moléculaires, qui constituent l'élasticité de torsion, puissent s'exercer identiquement de la même manière dans toute l'étendue de leur masse. Quand ces conditions ne sont pas remplies, les phénomènes sont beaucoup plus compliqués, et tout ce que l'on peut faire alors, c'est de multiplier les expériences, afin de pouvoir au moins établir entre eux quelque anologie probable. C'est dans cette vue que nous rapporterons ici les tableaux des principaux résultats qui ont été obtenus sur ce sujet en France et en Angleterre; ces tableaux offrent d'ailleurs l'avantage de contenir plusieurs nombres qui peuvent être utiles dans la pratique.

Tableau de la résistance que le fer forgé oppose à la torsion, d'après M. DULEAU.

DÉSIGNATION DES FERS.	Longueur en mètres.	Grosseur en mètres.	Angle de torsion produit par un poids de 10k. agissant à l'extrémité d'un bras de levier de $0^m,32$.
Fer rond du Périgord. . . .	2,81	0,0142	13,4
Id.	3,17	0,0197	6,
Fer rond angl. marq. Dowlois	2,40	0,0198	4,
Fer rond de l'Arriège. . . .	3,57	0,0215	4,8
Id.	2,89	0,0215	4,5
Fer rond du Périgord. . . .	3,19	0,0221	3,32
Id.	2,89	0,0230	3,
Fer rond anglais.	3,24	0,0235	2,34
Fer rond du Périgord. . . .	2,94	0,0265	1,82
Id.	3,35	0,0267	1,87
Id.	2,92	0,0357	0,625
Fer rond de l'Arriège. . . .	2,77	0,0268	1,65
		Côtés.	
Fer carré anglais marqué C 2	4,12	0.0200	6,5
Id.	2,52	0,0200	4,
Fer carré du Périgord. . . .	2,52	0,0204	3,08
Id.	3,39	0,0326	0,62
Fer plat anglais.	2,91	0,0340 0,0086	11,4
Id.	1,55	0,0340 0,0086	5,62
Fer plat du Périgord. . . .	2,91	0,0340 0,0105	7,2
Fer plat anglais marqué B. .	1,45	0,0678 0,0147	0,85

Tableau de la résistance que divers métaux opposent à la rupture, par torsion, d'après M. RENNIE.

INDICATION des corps soumis à la torsion.	Longueur des pièces.		Equarrissage		Poids produisant la rupture au moyen d'un levier de 2 pieds angl. ou de 0m,6096.		
	en pouces angl.	en mètres.	en pouces angl.	en mètres.	en livres avoir.		en kilog.
					l.	onc.	k.
Fer coulé horizontalement	0	0,	1/4	0,006	9	15	4,501
Fer coulé verticalement. .	0	0,	1/4	0,006	10	10	4,813
Fer coulé horizontalement	1/2	0,012	1/4	0,006	7	3	3,255
Id.	3/4	0,018	1/4	0,006	8	1	3,652
Id.	1	0,025	1/4	0,006	8	8	3,850
Fer coulé verticalement. .	1/2	0,012	1/4	0,006	10	1	4,567
Id.	3/4	0,018	1/4	0,006	8	9	3,386
Id.	1	0,025	1/4	0,006	8	5	3,766
Id.	6	0,150	1/4	0,006	9	12	4,416
Fer coulé horizontalement	0	0,	1/2	0,012	93	12	42,183
Id.	0	0,	1/2	0,012	74	00	33,522
Id.	10	0,254	1/2	0,012	52	00	23,556
Acier.	0	0,	1/4	0,006	17	1	7,727
Fer forgé d'Angleterre. . .	0	0,	1/4	0,006	10	2	4,584
Fer forgé de Suède. . . .	0	0,	1/4	0,006	9	8	4,303
Métal de canon dur	0	0,	1/4	0,006	5	0	2,255
Fonte jaune fine.	0	0,	1/4	0,006	4	11	2,123
Cuivre coulé.	0	0,	1/4	0,006	4	5	1,953
Etain.	0	0,	1/4	0,006	1	7	0,650
Plomb. . . . . s	0	0,	1/4	0,006	1	0	0,453

Les extrémités de chaque pièce étaient engagées dans des matrices carrées très-exactes. La longueur de la pièce est la longueur comprise entre les matrices.

Tableau de la résistance que le fer rond oppose à la rupture, d'après M. DUNLOP.

Longueur des pièces.		Diamètre.		Poids produisant la rupture. Le bras du levier est de 14 pi. 2 po. anglais.	Poids produisant la ruptur en supposant le bas du levier de 1 mètre.	
Pouces anglais.	Pouces français	Pouces anglais.	Pouces français.		Exprimé en livres avoir du poids.	Exprimé en kilogrammes.
2,750	0,0698	2,	0,0508	250	1097,4	497,12
3,250	0,0825	2,25	0,0571	384	1685,7	763,61
3,	0,0762	2,50	0,0635	408	1791,2	811,36
3,	0,0762	2,75	0,0698	700	3073,0	1391,5
4,	0,1016	3,25	0,0825	1170	5136,3	2326,7
5,	0,1270	3,50	0,0889	1240	5443,6	2466,0
5,	0,1270	3,75	0,0952	1662	7296,1	3305,1
5,	0,1270	4,	0,1016	1938	8200,0	3707,7
6,	0,1524	4,25	0,1079	2158	9473,5	4291,5

FIN DU SIXIÈME LIVRE.

LIVRE SEPTIÈME.

ACOUSTIQUE.

470. L'acoustique a pour objet de déterminer les lois suivant lesquelles le son se produit dans les corps et se transmet ensuite jusqu'à nos organes. Cette science est du ressort de la physique, parce que les corps, tandis qu'ils retentissent, et qu'ils produisent du bruit ou du son, éprouvent dans leur masse des modifications remarquables, tout-à-fait dépendantes des forces physiques qui les constituent. Nous verrons qu'ils sont alors ébranlés dans toutes leurs parties, et que les molécules qui les composent exécutent des oscillations ou des mouvemens de vibrations si rapides, qu'il est impossible d'en compter le nombre par des observations directes. L'étendue et la durée de ces mouvemens, la direction suivant laquelle ils se propagent, et l'harmonie qui doit exister entre eux, pour qu'ils se soutiennent et se perpétuent sans se détruire, sont les phénomènes les plus frappans qui se présentent aux physiciens pour étudier l'arrangement moléculaire des corps, leur élasticité et toutes les circonstances de leur structure intérieure.

Pour prendre une première idée du nombre et de la variété des phénomènes que l'acoustique embrasse, il suffit de remarquer que tous les sons que nous pouvons entendre, que toutes les nuances que notre organe peut saisir entre eux, correspondent certainement à des mo-

difications physiques différentes dans l'air qui nous apporte ces impressions, et dans le corps sonore, plus ou moins éloigné, duquel l'air les a reçues. C'est la série de ces mouvemens divers, communiqués de proche en proche depuis le corps sonore jusqu'à nous, qu'il s'agit de développer. Ainsi l'acoustique prend le son à sa naissance; elle constate, pour ainsi dire, le mouvement de toutes les molécules du corps qui le produit, elle montre comment il se communique à l'air, comment il en traverse la masse, et comment il vient enfin ébranler les membranes extérieures de notre organe; là, la science est à son terme; dès que le nerf acoustique est frappé, il n'y a plus de traces perceptibles de modifications matérielles, et, par conséquent, plus de phénomènes physiques.

Ces notions générales font assez voir en quoi l'acoustique diffère de la musique : la première de ces sciences considère le son hors de nous et des sensations qu'il peut produire; la seconde le considère en nous, dans les émotions qu'il peut faire naître, dans les sentimens ou dans les passions qu'il peut exciter ou modifier.

CHAPITRE PREMIER.

De la production du son et de sa transmission dans l'air atmosphérique.

471. *Le son est un mouvement particulier excité dans la matière pondérable.*

Si l'on écoute un son et qu'en même temps on observe la cause qui le produit, on remarque que la cause a cessé d'agir avant que le son soit parvenu jusqu'à notre organe : ainsi, dans l'explosion d'une arme à feu, on voit la lumière avant d'entendre le coup, pourvu qu'on soit placé seulement à la distance de quarante ou cinquante pas ; à une moindre distance, la lumière et le coup semblent frapper en même temps l'œil et l'oreille ; et, à mesure que la distance augmente, le temps qui s'écoule entre l'apparition de la lumière et la perception du bruit devient de plus en plus sensible. Il en est de même de l'explosion de la foudre : l'éclair brille avant que le coup de tonnerre se fasse entendre, et le temps qui s'écoule entre ces deux phénomènes, peut donner une mesure de la hauteur ou plutôt de la distance à laquelle la foudre éclate. Les chocs ou les bruits quelconques, dont on peut saisir l'instant, donnent lieu à la même observation. D'après cela, on peut juger que plusieurs observateurs, placés sur une même ligne à cent pas les uns des autres, n'entendraient pas au même instant le bruit qui serait excité à l'une des extrémités de cette ligne aux pieds du premier observateur : celui-ci entendrait le son avant tous les autres, le 2e l'entendrait avant le 3e, le 3e avant le 4e, etc., et ce qu'il importe de remarquer aussi, c'est qu'au moment où le 3e observateur,

par exemple, entendrait le son, le 1er et le 2e ne l'entendraient *plus*, tandis que le 4e et les suivans ne l'entendraient *pas encore;* on peut donc conclure de cette expérience, qu'un son brusque et instantané, comme celui qui résulte d'un choc ou d'une explosion, *passe* successivement d'un lieu à l'autre; qu'il n'est jamais entendu que dans un lieu à la fois, et que, par conséquent, il est un mouvement particulier dont notre organe est affecté.

Mais, dans quelle substance ce mouvement peut-il se propager avec tant de rapidité? est-ce dans l'air lui-même ou dans quelque autre fluide plus subtil et plus élastique, tel, par exemple, que le fluide qui propage la chaleur et la lumière? Cette question, fort difficile en apparence, peut être résolue d'une manière décisive par l'expérience suivante :

Au milieu de la platine de la machine pneumatique, fig. 50, on dispose un petit coussinet de laine ou de coton, sur lequel on place un mouvement d'horlogerie à détente, muni d'un timbre; cet appareil étant couvert d'une cloche à tige et à boîte à cuir, on fait le vide aussi exactement qu'il est possible, puis on tourne la tige pour presser la détente et lâcher le ressort. A l'instant l'horloge marche, le marteau frappe le timbre par intervalle, et aucun bruit ne se fait entendre au dehors. Mais, si l'on rend un peu d'air, on commence à distinguer un petit bruit très-aigu, correspondant à chaque coup du marteau; un peu plus d'air donne à ce bruit un peu plus de force; enfin, quand l'air est tout-à-fait rentré, le son est fort et se fait entendre au loin. Donc le son ne peut pas se propager dans le vide; là où il n'y a plus de matière pondérable il n'y a plus de véhicule du son.

Ainsi le son diminue d'intensité, par une double cause, à mesure qu'il s'élève dans l'atmosphère : il diminue parce que la distance augmente, et parce que l'air dans lequel il pénètre est de plus en plus raréfié. Les bruits les plus vio-

lens qui retentissent sur la terre ne peuvent pas sortir des limites de l'atmosphère ; ils s'affaiblissent à mesure qu'ils en approchent et s'éteignent sans pouvoir les franchir. Réciproquement, nul bruit ne peut venir des espaces célestes jusqu'à la terre ; les plus terribles explosions pourraient éclater sur le globe de la lune, sans qu'il nous soit donné d'en entendre le moindre retentissement.

Il suffit déjà des hauteurs, toujours petites, que les hommes ont pu atteindre, en gravissant les montagnes ou en s'élevant en ballon, pour produire un grand affaiblissement dans l'intensité du son. De Saussure dit qu'au sommet du Mont-Blanc, un coup de pistolet fait moins de bruit qu'un petit pétard tiré dans la plaine, et M. Gay-Lussac a constaté que l'intensité de sa voix était très-affaiblie lorsqu'il essayait de former des sons à 7,000 mètres de hauteur, suspendu dans son ballon, loin des nuages et de tous les corps solides.

L'air n'est pas le seul corps qui puisse transmettre les sons, tous les fluides élastiques jouissent de cette propriété ; on s'en assure aisément en faisant résonner le timbre de l'expérience précédente dans des cloches remplies de différens gaz ou de différentes vapeurs. Pour ces derniers fluides, les expériences peuvent se faire encore d'une manière plus commode en suspendant au centre d'un grand ballon (*Fig.* 49) une petite sonnette avec des fils de chanvre non tordus. Quand le vide est fait, la sonnette ne peut plus se faire entendre ; alors si on fait passer dans le ballon quelques gouttes d'un liquide volatil, tel que l'éther, la vapeur se forme à l'instant et le bruit se transmet au dehors.

L'eau transmet très-bien le son, les plongeurs peuvent entendre ce que l'on dit sur le rivage, et du rivage on entend le bruit des cailloux qui sont heurtés sous l'eau à de grandes profondeurs.

Enfin les corps solides peuvent non-seulement produire

le son, mais ils peuvent aussi le transmettre dans toute l'étendue de leur matière : quand le timbre est sous la cloche, il faut bien que le son traverse toute l'épaisseur des parois pour se faire entendre au dehors. Un grand nombre d'expériences analogues démontrent cette vérité ; nous nous bornerons à indiquer ici le phénomène curieux que l'on observe dans les longues pièces de bois. Si un observateur approche l'oreille de l'une des extrémités d'une poutre de sapin de 20 à 25 mètres de longueur, il entendra le bruit que l'on pourra faire à l'autre extrémité en y passant légèrement des barbes de plume contre le bout des fibres, et cependant ce bruit est si faible dans l'air qu'il est à peine entendu par ceux qui le produisent. Un moindre frémissement peut encore se transmettre de la même manière, car il suffit de parler très-bas, mais directement contre l'extrémité des fibres, pour que le bruit parcoure rapidement toute la longueur de la poutre et affecte l'organe qui écoute à l'autre extrémité ; cette longue masse solide fait en quelque sorte l'office de porte-voix.

Après avoir montré que le son est un mouvement, qu'il est produit dans la matière pondérable, et qu'il peut se propager dans tous les corps, il faut essayer de reconnaître quelle est la nature de ce mouvement.

472. *Le mouvement qui produit le son est toujours un mouvement de vibration.* La plupart des corps sonores accomplissent des oscillations sensibles pendant tout le temps qu'ils rendent des sons. Ce phénomène est surtout frappant dans les cordes de violon, de harpe, de guitare et des autres instrumens de cette espèce ; les oscillations, il est vrai, sont trop rapides pour que l'esprit puisse les compter ; mais l'œil les aperçoit, il saisit les limites des excursions de la corde, et il croit la voir en même temps, dans toutes les positions intermédiaires, à peu près comme il voit un cercle de feu lorsqu'un charbon enflammé est tourné en rond avec une vitesse suffisante,

c c′ (*fig.* 53), étant, par exemple, la position primitive de la corde, c L c′ la position qu'on lui donne en l'écartant avec le doigt ou autrement, dès qu'on l'abandonne, elle vient en c L′ c′, retourne en c L c′ et accomplit ainsi quelques milliers d'oscillations qui diminuent peu à peu d'amplitude et qui finissent par s'éteindre d'elles-mêmes après quelques instans. Le son cesse avec le mouvement, et recommence avec lui. Ce sont ces *oscillations* ou ces mouvemens de *va et vient* que l'on a coutume d'appeler en acoustique des *vibrations*.

Dans les timbres ou les cloches, ces vibrations sont moins apparentes ; mais elles existent comme dans les cordes ; pour s'en assurer, on prend une grande cloche de verre dans laquelle on suspend une petite balle de métal ; on la frappe pour lui faire rendre un son, et ensuite on l'incline pour que la balle vienne en toucher la paroi (*Fig.* 48) ; alors la balle saute d'un mouvement rapide, et l'on entend les chocs répétés qu'elle produit, en retombant, par son poids.

Enfin, il suffit de poser le doigt légèrement sur un corps sonore quelconque, pour sentir, dans toutes les parties de ce corps, un frémissement qui accompagne toujours la production du son ; mais si en un seul point l'on exerce une pression un peu forte, le mouvement est arrêté dans toute la masse et le son est éteint.

Il y a des instrumens, tels que la flûte et le sifflet, qui semblent faire exception au principe général que nous avons énoncé, car rien dans ces corps sonores ne paraît être en vibration ; mais nous verrons bientôt que, si la matière solide de ces instrumens ne vibre pas ou ne vibre que d'une manière insensible, il y a cependant une matière vibrante, et cette matière est la masse d'air qu'ils contiennent. Ainsi, le principe est vrai dans toute sa généralité, lorsqu'on l'applique seulement au corps sonore lui-même, et nous allons essayer de faire voir qu'il est

également vrai lorsqu'on l'applique à l'air ou au milieu quelconque qui enveloppe le corps sonore et qui doit recevoir le son pour le transmettre à des distances indéfinies.

473. *Chaque vibration du corps sonore excite dans l'air une ondulation d'une longueur déterminée.*

Cette proposition est une des plus importantes et des plus difficiles de l'acoustique; mais nous devons l'aborder dès à présent, et mettre d'autant plus de soin à la faire comprendre, qu'elle nous servira comme de point de départ pour exposer les théories de l'optique.

Concevons un tube horizontal T T′, fig. 51, ayant, par exemple, 10,000 pieds de longueur et 1 pied de diamètre; l'air qui le remplit est partout à la même température et sous la même pression; un piston P P′, joignant bien contre les parois, peut, en 1″ de temps, accomplir une oscillation entre les deux positions P P′ et S S′ qui sont à 1 pied de distance. Rien n'est établi d'avance sur les vitesses croissantes et décroissantes qu'il pourra prendre dans cet intervalle.

Tout étant en repos, le piston part de P P′ pour arriver en S S′; pendant ce mouvement, l'air du tuyau se *modifie* d'une certaine manière, et, pour mieux étudier les modifications qu'il éprouve, nous saisissons l'instant précis où le piston arrive en S S′, et nous supposons que toutes les molécules d'air *restent* comme elles se trouvent alors, ou pour mieux dire, nous supposons que celles qui sont comprimées ne puissent pas se débander, que celles qui sont dilatées ne puissent pas se rapprocher, et que celles qui sont en repos conservent leur état de repos.

Si la colonne d'air se comportait comme un corps solide parfaitement dur, il est clair que l'une de ses extrémités étant poussée par le piston, l'autre extrémité sortirait du tuyau au même instant et de la même quantité; mais il n'y a point de corps parfaitement dur; l'air est

très-fluide et très-compressible, et quand le piston pousse devant lui l'une des extrémités de la colonne, l'autre extrémité ne peut pas obéir au même instant ; il faut du temps pour que l'impression se transmette jusqu'à elle ; et, d'après la longueur que nous avons donnée au tuyau, nous pouvons bien affirmer qu'aucune molécule d'air n'est sortie par l'extrémité ouverte T′ pendant que le piston est passé de P P′ en S S′. Donc, l'air est *comprimé* dans le tuyau à droite du piston, puisqu'il occupe 1 pied de longueur de moins qu'il n'occupait tout à l'heure. De plus, il est évident qu'il n'est pas comprimé *également* dans toute l'étendue du tuyau ; car, pendant la durée de 1″ que le piston a dû mettre pour venir de P P′ en S S′, la compression n'a pu se communiquer et se faire sentir qu'à une certaine distance, telle que A A′, par exemple. Cette partie de la colonne d'air, qui a pu être *modifiée* pendant le mouvement du piston, est ce que l'on appelle *une onde* ou *une ondulation*, et la *longueur de l'onde* est la distance de ses deux extrémités S S′ et A A′.

Examinons maintenant comment l'air est modifié dans les différentes parties de l'onde ; et, pour cela, concevons des plans parallèles au piston, qui partagent la colonne d'air en petites tranches, telles que a b c d, c d e f, etc., ayant toutes la même épaisseur ; il est probable que dans chaque tranche toutes les molécules d'air, depuis l'axe jusqu'au contour du tuyau, éprouvent les mêmes modifications, car tout est pareil pour chacune d'elles. Ainsi, pour savoir ce qui est arrivé à toute la masse d'air qui compose l'onde, il suffit de connaître ce qui est arrivé à une molécule de chaque tranche. Or, puisque l'air qui était compris depuis P P′ en A A′ a été comprimé dans sa totalité et réduit à n'occuper que l'espace S S′ A A′, il faut bien que dans chaque tranche les molécules aient éprouvé deux effets : 1° qu'elles aient été comprimées, 2° qu'elles aient reçu une certaine vitesse *impulsive*, c'est-à-dire, qui

les éloigne du centre d'ébranlement ou du piston qui les a poussées.

Il est évident que, dans toute la longueur de l'onde, les différentes tranches ne peuvent être au même état : la dernière tranche, par exemple, celle qui touche A A′, n'a pu recevoir qu'une très-petite vitesse et une compression très-petite, puisque le mouvement ne fait que d'y arriver ; la première tranche, celle qui touche S S′, est déjà revenue au repos, puisque nous considérons les phénomènes à l'instant où le piston s'arrête ; et comme elle n'a plus de vitesse, elle n'a pareillement plus de compression ; elle a déjà communiqué tout ce qu'elle avait. Au contraire, les tranches qui sont vers le milieu de l'onde ont en même temps la plus forte compression et la plus grande vitesse. Il y a donc un certain ordre dans les diverses modifications des différentes tranches, tant pour la vitesse des molécules d'air, que pour leur compression. Cet ordre dépend de l'ordre des vitesses croissantes et décroissantes par lesquelles le piston a dû passer en se transportant de P P′ en S S′.

On peut représenter, par une figure qui parle aux yeux, tous les mouvemens qui caractérisent une onde depuis son origine jusqu'à sa fin ; pour cela, il suffit d'élever sur la ligne S A, qui en marque la longueur, des perpendiculaires dont les hauteurs représentent le degré de compression des tranches correspondantes ; les extrémités de ces perpendiculaires formeront une ligne dont la courbure ou les sinuosités représenteront fidèlement l'ordre dans lequel se succèdent les compressions des tranches successives. En S, la hauteur de la perpendiculaire sera nulle puisque la compression est nulle ; il en sera de même en A ; en X la hauteur de la perpendiculaire sera, par exemple, X X′, en Y elle sera Y Y′, en M elle sera M M′, etc., en sorte que la courbe des compressions S M′ A pourrait être une demi-circonférence de cercle. Mais on conçoit

que, sur cette longueur s A, on peut tracer une foule de courbes continues passant par les points s et A, comme on le voit en s n A, s n′ A, et même, l'une de ces courbes étant donnée, on peut toujours attribuer au piston, dans son passage de p p′ en s s′, un mouvement tel qu'il excite une onde dont les compressions successives soient représentées par cette courbe. Quand il y a plusieurs sinuosités dans la courbe des compressions comme en s′ p q r A, on dit que l'onde correspondante est une *onde dentelée*.

Après avoir fait l'analyse des diverses modifications que le piston peut imprimer à la colonne d'air en passant de p p′ en s s′ dans l'intervalle de 1″, essayons de voir ce qui arrivera dans les instans suivans, le piston restant toujours arrêté en s s′. L'air momentanément comprimé depuis s s′ en A A′, ne peut pas rester dans cet état ; car, le tuyau étant ouvert en T′, il faut qu'après un certain temps, l'air excédant soit sorti, et que toute la colonne soit revenue au repos. Or, on démontre, en mécanique, que la compression et la vitesse se communiquent de proche en proche de la manière suivante ; dans le 1er instant de la 2e *seconde*, la vitesse passe à droite de A A′, envahit une première tranche, et en même temps la tranche qui touche le piston tombe au repos ; dans le 2e instant une deuxième tranche à droite de A A′ est envahie, et une deuxième tranche en avant du piston tombe au repos ; dans le 3e instant, le mouvement gagne la 3e tranche en avant de A A′, et le repos gagne la 3e tranche en avant du piston, etc. ; de telle sorte, qu'à la fin de la 2e *seconde* l'air est en repos depuis s en A, et il est agité depuis A en B ; la longueur A B est égale à s A, et de plus, les compressions et les vitesses depuis A en B sont exactement ce qu'elles étaient depuis s en A. Ainsi, l'ondulation s'avance et se transporte, en quelque sorte, tout d'une pièce en conservant sa longueur et tout ses carac-

tères ; à la fin de la 3e *seconde* elle serait en B C ; à la fin de la 4e, en C D, etc.

L'onde que nous venons de décrire, dans laquelle toutes les tranches sont *comprimées* et toutes les vitesses *impulsives*, s'appelle *onde condensée* ou quelquefois *onde condensante*.

Mais il est facile de voir que des phénomènes inverses se sont développés à gauche du piston P P′ pendant qu'il s'est transporté en s s′. En effet, un espace plus grand a été offert à la colonne d'air, la 1re tranche s'est précipitée à la suite du piston *en se raréfiant*, la 2e tranche s'est précipitée pour suivre la 1re et prendre sa place, etc., etc. ; et après la 1re *seconde*, quand le piston s'arrête en s s′, la raréfaction s'est fait sentir jusqu'en *a*. L'onde qui en résulte s'appelle *onde raréfiée*, ou bien *onde raréfiante ;* sa longueur est exactement la même que celle de l'onde condensée qui se produit devant le piston ; les raréfactions sont nulles en s s′ et en a a′, et, dans toutes les tranches, les vitesses sont *apulsives*, c'est-à-dire dirigées vers le centre de l'ébranlement.

Cette onde raréfiée se propage aussi, de proche en proche, dans toute l'étendue de la colonne d'air, en conservant partout la même longueur et la même succession de vitesses et de raréfactions.

Ces considérations nous laissent entrevoir, dès à présent, les principes sur lesquels repose le phénomène de l'audition ; car, si nous imaginons dans quelques points du tuyau une tranche quelconque H H′, fig. 51, nous pouvons remarquer qu'elle éprouve successivement toutes les modifications qui constituent l'onde s A, puisqu'elle devient, tour à tour, la 1re, la 2e, la 3e..., et la dernière tranche de cette onde. Et, si dans cette tranche nous imaginons une petite membrane mm′, très-délicate et très-élastique, il est évident qu'elle devra recevoir dans leur ordre toutes les impulsions qui sont successivement données aux molé-

cules d'air; or c'est là précisément ce qui arrive à la *membrane du tympan* qui termine le conduit, dont le pavillon de l'oreille est l'épanouissement. On conçoit donc que cette membrane, dont la mobilité égale celle de l'air, puisse recevoir et compter en quelque sorte toutes les modifications des différentes tranches de l'onde sonore.

Si le piston après s'être arrêté en s s', pendant un instant imperceptible, revient dans sa position primitive p p' en repassant par les mêmes vitesses, on voit qu'il excitera derrière lui, à droite de s s', une onde raréfiée toute pareille à celle qu'il avait excitée à gauche pendant *son allée*, et que cette onde se mettra à la suite de la première onde condensée, de telle sorte qu'à la fin de la 2e *seconde*, l'onde condensée sera entre A et B, et l'onde raréfiée entre A et s. De l'autre côté, au contraire, l'onde raréfiée sera de a en b, et l'onde condensée de a en s, puis une autre *allée* et une autre *venue* du piston exciteront encore des ondes semblables, et semblablement disposées, qui *courront* après les premières, et ainsi de suite. Alors une oreille qui serait placée quelque part dans le tuyau n'entendrait plus un son passager comme le bruit d'une explosion, mais un *son continu* plus ou moins grave, plus ou moins fort et d'un timbre plus ou moins agréable. Entre le son de droite et celui de gauche, il n'y aura que cette seule différence, que dans l'un c'est l'onde condensée qui marche la première, et dans l'autre c'est l'onde raréfiée.

474. *De la gravité et de l'acuité des sons.* La différence qui existe entre les sons graves et les sons aigus est si frappante pour nos organes, qu'elle doit certainement correspondre à quelque modification physique bien caractérisée dans l'air qui porte ces sons. Nous démontrerons plus tard, par des observations directes, que le son le plus grave que nous puissions entendre a une longueur d'onde de 32 pieds, et que le son musical le plus aigu n'a qu'une longueur de 18 lignes environ. Entre ces deux limites, sont

compris tous les sons et toutes les nuances que l'oreille humaine puisse distinguer, et deux ondes de même longueur donnent toujours *l'unisson* parfait, quelle que soit d'ailleurs l'intensité ou le timbre des sons qu'elles portent. Les ondes plus longues que 32 pieds et celles qui sont plus courtes que 18 lignes, viennent sans doute à leur manière frapper aussi la membrane du tympan; mais il n'en résulte aucune sensation distincte; l'organe reste sourd pour ces sons-là. Le rapport de gravité et d'acuité de deux sons est ce qu'on appelle le *ton*.

475. L'*intensité* du son ne peut pas dépendre de la longueur des ondes, elle dépend seulement des compressions plus ou moins fortes ou des vitesses plus ou moins grandes que l'air a reçues du corps sonore et qui se transmettent de couche en couche jusqu'à notre organe. Une corde de basse peut être à l'unisson avec le bruit déchirant du tam-tam; c'est-à-dire que les ondes sont de même longueur, mais l'air frappé par le tam-tam accomplit des vibrations dont l'amplitude est beaucoup plus grande; c'est là ce qui fait son intensité assourdissante.

476. Le *timbre* des sons est bien plus difficile à caractériser que le ton et l'intensité; les physiciens ne sont pas complétement d'accord sur ce point, mais il paraît bien probable que le timbre dépend de l'ordre dans lequel se succèdent les vitesses et les changemens de densité dans les différentes tranches d'air qui sont comprises entre les deux extrémités de l'onde. On a même supposé que les *sons articulés* par une voix diffèrent des sons inarticulés, en ce que les ondes sont toujours *dentelées* pour les premiers et ne le sont jamais pour les seconds.

477. *Tous les sons, quel que soit leur ton, leur timbre ou leur intensité, se propagent dans l'air avec la même vitesse.* Lorsque plusieurs observateurs écoutent un concert à diverses distances, il entendent tous la même mesure et la même harmonie. Ainsi, en se propageant au loin, tous

les sons se succèdent dans le même ordre et aux mêmes intervalles; ce qui suppose nécessairement qu'ils marchent avec la même vitesse; car, si les sons graves, par exemple, prenaient l'avance sur les sons aigus, la mesure serait bientôt rompue, et ce qui serait une harmonie à 10 pas serait à 100 pas une insupportable cacophonie.

478. *La vitesse du son dans l'air est de* 340 *mètres par seconde à* 16°. On a fait de nombreuses expériences en différens lieux de la terre, pour déterminer avec exactitude la vitesse du son. On peut citer particulièrement en France, celles du P. Mersennes, celles de Cassini et Huyghens, celles des académiciens en 1738, et celles du Bureau des Longitudes en 1822; en Angleterre, celles de Walker en 1698, celles de Flamsteed et Halley, et celles de Derham en 1704; en Italie, celles de l'académie del Cimento en 1660, et celles de Blanconi, en 1440; en Allemagne, celles de Mayer en 1778; celles de Muller en 1791, et celles de Bensenberg en 1809; dans les Pays-Bas, celles de Moll et Vanbeek en 1823; enfin en Amérique, celles de La Condamine en 1740 et celles d'Espinosa de Bauza en 1794. Ces expériences offrent dans leurs résultats des différences assez considérables. Nous nous bornerons à exposer seulement celles qui ont été faites, près de Paris en 1822, par le Bureau des Longitudes, sur la proposition de M. Delaplace.

Les deux stations que l'on avait choisies étaient Villejuif et Montlhéry. A Villejuif, le capitaine Boscary fit disposer, sur un point élevé, une pièce de six avec des gargousses de deux et de trois livres de poudre. Les observateurs placés autour de la pièce, étaient MM. de Prony, Arago et Mathieu. A Montlhéry, le capitaine Pernetty fit disposer une pièce de même calibre, avec des gargousses de même poids; les observateurs étaient MM. de Humboldt, Gay-Lussac et Bouvard. Les expériences furent faites de nuit et commencèrent à 11 h. du soir le 21 et le 22 juin 1822. De Villejuif, l'on apercevait très-dis-

tinctement le feu de l'explosion de Montlhéry et *vice versâ*; le ciel était serein et l'air à peu près calme.

Les chronomètres étant bien reglés, il avait été convenu que chaque station tirerait 12 coups à 10′ les uns des autres, et que la station de Montlhéry commencerait 5′ avant celle de Villejuif; de telle sorte qu'un observateur qui aurait été placé juste au milieu de la ligne des deux canons aurait entendu de 5′ en 5′ des *coups croisés* ou *réciproques*, le 1er venant de Montlhéry, le 2e de Villejuif, le 3e de Monthléry, etc. Ces coups réciproques étaient le seul moyen de découvrir l'influence du vent sur la vitesse du son, ou plus généralement de découvrir si au milieu des variations sans nombre qui modifient l'atmosphère à chaque instant, le son emploie le même temps pour parcourir le même espace dans les deux directions opposées.

Les observateurs de Villejuif entendirent parfaitement tous les coups de Montlhéry; chacun d'eux notait sur son chronomètre le temps qui s'écoulait entre l'apparition de la lumière et l'arrivée du son; la plus grande différence que l'on trouve entre les trois résultats correspondans à une observation ne s'élève pas à plus de 3 ou 4 dixièmes de seconde, et entre les douze observations la différence des moyennes ne dépasse pas 3 dixièmes de seconde; le temps le plus long est 55″, le plus court 54″,7 et le temps moyen de 54″,81.

A Montlhéry, on ne put entendre que sept des douze coups tirés à Villejuif; et même sur ces sept coups il n'y en eut pas un seul qui fût entendu par les trois observateurs à la fois. Cependant les résultats sont assez concordans: le temps le plus long est 54″,9, le plus court 53″,9 et le temps moyen de 54″,43.

Ainsi on peut prendre 54″,6 pour le temps moyen que le son mettait à passer d'une station à l'autre.

Restait à mesurer exactement l'intervalle des deux sta-

tions; M. Arago fut chargé de ce soin, et en s'appuyant sur la triangulation de la méridienne, il trouva que les deux canons étaient à une distance de 9549,6 toises.

En divisant cette longueur par 54″,6, durée moyenne de propagation, l'on trouve 174,9 toises ou 340^{m},88, pour l'espace que le son a parcouru en 1″ dans la nuit du 21 juin 1822; la température était de 16° centigrades; le baromètre marquait à Villejuif 756,^{mm}5, et l'hygromètre de Saussure 78°.

Ainsi la vitesse du son est de 340^{m},88 à la température de 16°.

En réduisant, par le calcul que nous verrons plus loin, cette vitesse à ce qu'elle serait pour 10°, on trouve 337^{m},28, et pour la température 0 on trouve 331^{m},12.

CHAPITRE II.

Évaluation numérique des sons par les vibrations des cordes, des tuyaux cylindriques, des lames et de la sirène.

479. *Lois générales des vibrations des cordes et des sons harmoniques qu'elles produisent.*

Lorsqu'on pince une corde tendue sur un instrument quelconque, comme une harpe ou une guitare, les vibrations qu'elle accomplit sont beaucoup trop rapides pour que l'on puisse en compter le nombre absolu; cependant l'on peut alors distinguer assez nettement deux phénomènes remarquables : premièrement le son *monte* et devient plus aigu dès qu'on raccourcit la corde ou qu'on lui donne une plus forte tension, et secondement le nombre des vibrations augmente d'une manière sensible. Ainsi, il y a certainement une dépendance entre le son de la corde, sa longueur, sa tension et la rapidité de ses vibrations; mais cette dépendance, si facile à constater par l'expérience, ne peut être déterminée que par le secours du calcul; elle constitue ce que l'on appelle en mécanique le *problème des cordes vibrantes*, problème qui fut résolu en premier lieu par Taylor (*Methodus incrementorum*, etc., 1716), et qui eut beaucoup de célébrité, parce qu'il excita pendans près d'un demi-siècle de vives discussions entre les plus grands géomètres. Jean Bernouilli, D'Alembert, Euler et Daniel Bernouilli, avaient beaucoup écrit sur ce sujet, quand Lagrange, en 1759, presque à son début dans la carrière des sciences, eut la gloire de lever toutes les difficultés et de mettre un terme à la discussion.

Voici les résultats auxquels on arrive par le calcul, et qui expriment les lois des vibrations des cordes :

1° *Les nombres de vibrations d'une corde sont en raison inverse de sa longueur*, c'est-à-dire, que si une corde sonore quelconque est tendue sur un instrument, comme le violon, la basse, la guitare, etc., et qu'elle fasse dans un certain temps un nombre de vibrations représenté par 1, lorsqu'elle vibre à vide ou dans toute sa longueur, elle fera dans le même temps des nombres de vibrations représentés par 2, 3, 4, etc., lorsque, *sans changer sa tension*, l'on fera vibrer seulement $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, etc., de sa longueur ; elle ferait des nombres de vibrations représentés par $\frac{3}{2}$, $\frac{4}{3}$, $\frac{5}{4}$, etc., si l'on faisait vibrer seulement $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{4}{5}$, etc., de sa longueur. Pour limiter ainsi la partie vibrante, il suffit de promener un petit chevalet sur lequel on presse légèrement la corde avec le doigt.

2° *Les nombres de vibrations d'une corde sont proportionnels aux racines carrées des poids qui la tendent ;* c'est-à-dire, que si l'on représente par 1 le nombre des vibrations d'une corde qui est tendue par un poids 1, ce nombre de vibrations dans le même temps deviendra 2, 3, 4, etc., quand, *sans changer sa longueur*, on la tendra par des poids 4, 9, 16, etc.

3° *Les nombres de vibrations des cordes de même matière sont en raison inverse de leur épaisseur ou de leur diamètre*, c'est-à-dire, que si l'on prend, par exemple, deux cordes de cuivre ou deux cordes d'acier comme celles d'un piano, dont l'une ait un diamètre double de l'autre, qu'on les tende par *un même poids* et qu'on en fasse vibrer *des longueurs égales*, la plus mince fera dans le même temps deux fois plus de vibrations que la plus grosse. Il est probable que deux cordes à boyaux ne suivraient pas exactement cette loi, parce qu'on n'est jamais sûr qu'elles soient absolument de même matière.

4° *Les nombres de vibrations des cordes de matières*

différentes sont en raison inverse des racines carrées de leurs densités; c'est-à-dire, que si l'on prend, par exemple, une corde de cuivre dont la densité est presque 9, et une corde à boyau dont la densité est à peu près 1, qu'elles aient le même diamètre, qu'on les tende par des poids égaux et qu'on en fasse vibrer des longueurs égales, le nombre des vibrations de la corde de cuivre sera trois fois moindre que le nombre des vibrations de la corde à boyau. Il est évident que les lois précédentes ne peuvent s'appliquer qu'à des cordes homogènes dans leur longueur et dans leur épaisseur, et que, par exemple, elles ne s'appliquent nullement aux cordes à boyau revêtues d'un fil de métal, dont on se sert pour la harpe et pour les 4es des basses et des violons. Le métal enveloppant est ici une masse inerte qui doit être entraînée par l'élasticité de la corde et qui augmente par conséquent la durée des vibrations.

Ces principes une fois posés, il devient très-facile de représenter les sons par des nombres. On se sert pour cela d'un instrument qui donne des sons purs et qui permette de mesurer avec exactitude les longueurs des cordes. Cet instrument s'appelle *sonomètre* ou *monocorde*; on peut lui donner différentes formes; nous supposerons que l'on emploie celui qui est représenté dans la *Figure* 52, il porte une corde à boyau et une corde de métal, pour montrer que sur l'une et sur l'autre les effets sont les mêmes. La corde est attachée à un crochet C, passe sur les chevalets fixes F et F′, sur une poulie mobile M, et s'attache à un autre crochet C′ auquel on suspend les poids P. Le chevalet mobile H H′ peut glisser sous la corde sans la toucher, on l'arrête où l'on veut, et pour réduire la longueur de la corde il suffit de la presser avec le doigt sur l'arête T de ce chevalet. Nous verrons plus tard que la caisse S S′ sert à renforcer le son. Supposons maintenant que la corde soit convenablement chargée pour rendre un son plein et pur en

vibrant à vide, que l'on prenne ce son pour point de départ, ou pour l'*ut*, et qu'on avance peu à peu le chevalet pour obtenir successivement les autres *notes* de la *gamme*, *ré mi fa sol la si ut*, la longueur de la corde entière étant représentée par 1, on trouvera pour les autres notes les longueurs suivantes :

Noms des sons. . . . . ut ré mi fa sol la si ut.
Longueurs des cordes. 1 $\frac{8}{9}$ $\frac{4}{5}$ $\frac{3}{4}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{3}{5}$ $\frac{8}{15}$ $\frac{1}{2}$.

Mais les nombres de vibrations de la corde étant en raison inverse de sa longueur, on aura donc, en représentant par 1 le nombre des vibrations qui donnent l'*ut* :

Noms des sons. . . . . ut ré mi fa sol la si ut.
Nombre des vibrations. 1 $\frac{9}{8}$ $\frac{5}{4}$ $\frac{4}{3}$ $\frac{3}{2}$ $\frac{5}{3}$ $\frac{15}{8}$ 2.

On sait que *l'intervalle* de *ut* à *ré* s'appelle une *seconde;* de *ut* à *mi* une *tierce;* de *ut* à *fa* une *quarte;* de *ut* à *sol* une *quinte;* de *ut* à *la* une *sixième;* de *ut* à *si* une *septième;* de *ut* à *ut* une *octave*, etc. Ainsi quand deux sons forment *l'octave*, le nombre des vibrations du plus aigu est double du nombre des vibrations du plus grave; pour la *tierce*, le plus grave fait 4 vibrations et le plus aigu 5; pour la *quarte*, le plus grave 3 et le plus aigu 4; pour la *quinte*, le plus grave 2 et le plus aigu 3, etc. Ces rapports sont invariables, l'oreille n'y tolère aucune altération, c'est-à-dire, qu'il faut pour que deux sons soient à l'octave que le nombre des vibrations du plus aigu divisé par le nombre des vibrations du plus grave donne 2; qu'il donne 3/2 pour la quinte, etc. Ainsi le nombre des vibrations du *ré* étant $\frac{9}{8}$, son *octave aiguë* sera $\frac{9}{8} \times 2 = \frac{9}{4}$, et son *octave grave* $\frac{9}{8} : 2 = \frac{9}{16}$, etc.; sa tierce sera $\frac{9}{8} \times \frac{5}{4} = \frac{45}{32}$; sa quinte $\frac{8}{9} \times \frac{3}{2} = \frac{24}{18}$, etc.; réciproquement, le *ré* et le *sol* forment une *quarte*, parce que le rapport de sol à ré est $\frac{3}{2} : \frac{9}{8} = \frac{3}{2} \times \frac{8}{9} = \frac{4}{3}$ qui est le rapport

de quarte ; tandis que le *ré* et le *la* ne forment pas une *quinte,* parce que le rapport de *la* à *ré* est $\frac{5}{3} : \frac{9}{8} = \frac{5}{3} \times \frac{8}{9} = \frac{40}{27}$ qui n'est pas $\frac{3}{2}$ comme il est nécessaire pour la quinte, etc.

On peut d'après cela écrire facilement autant d'octaves que l'on voudra, *au-dessus* ou *au-dessous* de l'octave précédente ; puisqu'il suffira de multiplier tous les nombres de celle-ci par 2, par $2^2 = 4$, par $2^3 = 8$, etc., pour avoir successivement la 1re, la 2e, la 3e octave *au-dessus*, et de les multiplier par $\frac{1}{2}$, par $\frac{1}{2^2} = \frac{1}{4}$, par $\frac{1}{2^3} = \frac{1}{8}$, etc., pour avoir la première, la deuxième, la troisième octave *au-dessous*, etc.

Ces sons ne sont pas les seuls que l'on emploie dans la musique, on emploie aussi des *dièses* et des *bémols*. Mais il est facile de s'assurer au moyen du monocorde, par des expériences analogues aux précédentes, que *diéser* un son, c'est multiplier le nombre de ses vibrations par $\frac{25}{24}$; et que le *bémoliser*, c'est le multiplier par $\frac{24}{25}$. Ainsi tandis que l'*ut*, par exemple, fait 24 vibrations, l'*ut dièze* en fait 25 et tandis que le *si* fait 25 vibrations le *si bémol* n'en fait que 24.

Lorsque deux sons s'approchent tellement de l'unisson que l'un d'eux fait 80 vibrations tandis que l'autre en fait 81, en sorte que leur *intervalle* ou leur rapport soit $\frac{80}{81}$, on dit qu'ils ne diffèrent que d'un *comma*. Les organes exercés sentent très-bien cette différence.

Lorsqu'on fait résonner ensemble deux sons qui sont à *l'octave*, ou à la *tierce*, ou à la *quinte*, ils forment une *consonnance*, ou un *accord ;* au contraire, la *seconde* ou la *septième* forment une *dissonance*.

Les *sons harmoniques* sont ceux qui suivent la série des nombres naturels, 1, 2, 3, 4, 5, etc. ; le 2e est l'*octave* du 1er ; le 3e en est la *douzième*, ou la double quinte ; le 4e la *double octave ;* le 5e la *dix-*

septième ou la triple tierce, etc.; ainsi ils ne forment jamais de dissonance. C'est sans doute pour cette raison qu'on les appelle depuis long-temps sons harmoniques, mais un phénomène remarquable, est l'existence simultanée de tous ces sons dans les vibrations d'une seule corde. En effet, si l'on met en mouvement avec l'archet une corde de violon ou de violoncelle, on n'entend pas seulement le *son fondamental* de cette corde, celui qu'elle rend en vibrant dans toute sa longueur, mais on entend encore le son 3 ou sa douzième, et le son 5 ou sa dix-septième; il y en a même qui prétendent démêler aussi le son 6 ou sa dix-neuvième. Ce phénomène trouve son explication dans l'expérience suivante que l'on doit à Sauveur. On place le chevalet mobile sous le milieu de la corde du monocorde, et avec le doigt on appuie *très-légèrement* sur ce point, tandis que l'on passe l'archet *près du chevalet fixe* pour ébranler l'une des moitiés de la corde; cette moitié s'ébranle en effet, mais l'autre moitié entre aussi en vibration très-visiblement, et si l'on veut s'en assurer il suffit de mettre en divers points près de son milieu de petits chevrons de papier qui seront lancés au loin. La figure que prend alors la corde est représentée dans la *Fig.* 54. On peut ensuite placer le chevalet mobile à la fin du premier tiers de la corde, et quand on ébranle ce premier tiers avec l'archet comme tout à l'heure, les deux autres tiers entrent à l'instant en vibration; mais chacun d'eux vibre séparement, autour du point *n* qui reste fixe quoique libre, *Fig.* 55. Pour s'en assurer on met encore de petits chevrons de papier, en *v*, en *n* et en *v'*. Ceux qui sont en *v* et *v'* sautillent d'abord et sont bientôt renversés, tandis que celui qui est en *n* reste immobile. Le point *n* s'appelle un *nœud*, et les points *v* et *v'* des *ventres*.

L'expérience réussit de même lorsqu'on place le chevalet à la fin du premier quart, du premier cinquième ou du premier sixième de la corde; il y a alors, 2, 3 ou 4

nœuds sur lesquels les chevrons restent immobiles, tandis qu'ils sautent vers le milieu de tous les ventres.

Sauveur s'appuie sur ces résultats curieux, pour conclure qu'une corde sonore ébranlée à vide ne vibre pas seulement dans toute sa longueur, mais que chacune de ses moitiés, chacun de ses tiers, chacun de ses quarts, de ses cinquièmes et de ses sixièmes, etc., vibre séparément et produit le son qui convient à sa longueur, et que telle est la cause de la formation des harmoniques; en effet: que le milieu *m* de la corde *Fig.* 56, oscille de *h* en *h'*, quand la corde vibre en totalité, ce mouvement n'empêche pas que chaque moitié ne vibre autour de lui, comme s'il était en repos; il en est de même de tous les nœuds correspondans à chaque tiers, à chaque quart, etc.; et si *f m f'*, *Fig.* 56, représente par exemple une position de la corde entière pendant ses vibrations, il faut concevoir qu'elle est là partagée en une foule de parties vibrantes dont plusieurs sont indiquées sur la figure.

480. *Lois générales des vibrations des tuyaux cylindriques et du battement qui résulte de deux sons voisins.*

Les tuyaux sonores tels qu'ils entrent dans la composition des orgues sont en général disposés comme un *sifflet* ou comme un *flageolet*. On y distingue le *pied*, la *bouche* et le *tuyau* proprement dit : le *pied* apporte le *vent*, la *bouche* fait *parler*, le *tuyau* contient la colonne d'air qui doit entrer en vibration et produire le son. Dans le sifflet le pied p p', *Fig.* 62, apporte le vent par la *lumière l l'*, la bouche *b b'* a sa *lèvre inférieure* au bord *b* de la lumière et sa *lèvre supérieure* au *biseau b'*. Dans le tuyau d'orgue, *Fig.* 61, le pied est creux, et la lumière *l l'* qui apporte le vent n'est qu'une espèce de fente dans la plaque qui ferme la grande base du pied; la bouche est plus ou moins ouverte, c'est-à-dire, que la lèvre supérieure *b'* est plus ou moins éloignée; quelquefois cette lèvre est mobile pour s'approcher ou s'éloigner à volonté,

Pour donner le vent aux tuyaux dans les expériences, on se sert d'un soufflet ordinaire s s′, *Fig.* 60, qui se gonfle au moyen de la pédale p ; le petit conduit t t′ apporte le vent dans la caisse c c′ dont la table supérieure est percée d'une douzaine de trous o o ; ces trous sont fermés par de petites soupapes à ressort et s'ouvrent à volonté au moyen des touches hh′.

Un tuyau étant mis en place et le soufflet gonflé, on met le doigt sur la touche, et au moyen de la tige *t t′* que l'on presse plus ou moins on donne le vent avec plus ou moins de force.

Supposons d'abord que le tuyau soit *ouvert* et qu'il ait partout le même diamètre ; en lui donnant le vent avec plus ou moins de force et en changeant, s'il le faut, la largeur de la bouche on parviendra à lui faire rendre différens sons ; et si l'on représente par 1 le *son fondamental*, c'est-à-dire, le plus grave qu'il puisse donner, les autres sons suivront la série des nombres naturels 1, 2, 3, 4, etc., et quelque moyen que l'on essaie on ne parviendra jamais à lui faire rendre un son quelconque compris entre ceux-là.

Tous les tuyaux cylindriques ou prismatiques de même longueur donneront le *même son fondamental* et la même série 2, 3, 4, etc., pourvu que leur longueur soit 10 ou 12 fois leur diamètre, et que la matière qui les compose ait une rigidité convenable ; seulement si les tuyaux sont très-minces, ils octavieront presque toujours, c'est-à-dire, qu'ils donneront le son 2 et les suivans, et il sera très-difficile d'en tirer le son fondamental.

Quand le tuyau rend le son 2, on peut le couper par le milieu et enlever sa moitié supérieure sans que le son éprouve la moindre altération ; de même quand il produit le son 3, on peut le diviser en trois et enlever l'un des tiers et même les deux tiers supérieurs, etc.

Ainsi pour le son 2 il y a un *ventre* au milieu de la

longueur du tuyau, c'est-à-dire, que la couche d'air qui s'y trouve n'est, pendant la vibration sonore, ni raréfiée ni condensée; car si elle éprouvait un changement de densité, on ne pourrait pas en ce point faire une ouverture sans altérer le son, et à plus forte raison ne pourrait-on pas enlever la moitié supérieure du tuyau. Pour le son 3 il y a deux *ventres intermédiaires*, l'un à la fin du premier tiers, l'autre à la fin du second tiers de la longueur, car si l'on fait des ouvertures dans ces points le son n'est pas changé, et il l'est toujours si l'on fait des ouvertures ailleurs. Il y a trois ventres intermédiaires pour le son 4; 4 pour le son 5, etc.

C'est à Daniel Bernouilli que l'on doit ces expériences, et toute la théorie des instrumens à vent (*Acad. des sciences*, 1762), telle à peu près qu'elle est admise aujourd'hui; on en conclut que l'onde sonore qui correspond au son fondamental d'un tuyau a la même longueur que ce tuyau; que celle qui correspond au son 2 a une longueur moitié, que celle du son 3 est $\frac{1}{3}$ du tuyau; celle du son 4, seulement $\frac{1}{4}$, etc. Car, les deux extrémités d'un tuyau ouvert sont essentiellement des ventres où la couche d'air ne peut être ni condensée ni raréfiée, puisqu'elle communique avec l'air extérieur, et l'espace compris entre deux ventres est toujours la longueur de l'onde.

Pour les *tuyaux fermés*, la loi des vibrations est différente : on en peut faire l'expérience avec un tube de verre d'environ 30 pouces de longueur sur 1 pouce de diamètre, *Fig.* 57, dans lequel on fait glisser un piston P, au moyen de la tige T. Après avoir ajusté le tube sur une embouchure convenable on l'adapte au soufflet, comme on le voit plus en petit dans la figure 60, et en laissant passer le courant d'air d'abord très-lentement on obtient le son fondamental que nous représenterons par 1; un courant un peu plus fort fait sortir le son 3; et en augmentant progressivement la force du courant par une pression croissante on

fait sortir à la suite les sons 5, 7, 9, etc.; ainsi un tuyau fermé, de longueur constante, rend différens sons qui suivent la série des nombres impairs 1, 3, 5, 7, etc., sans qu'il soit possible d'en faire sortir aucun son intermédiaire.

A cette loi il faut ajouter encore ce fait remarquable que le son fondamental d'un *tuyau fermé* et le son fondamental d'un *tuyau ouvert*, de même longueur, sont toujours à l'octave; et que le tuyau fermé donne le son grave ou le son 1, tandis que le tuyau ouvert donne le son aigu ou le son 2. C'est ce qu'il est facile de vérifier par l'expérience. Comme, d'une autre part, l'onde correspondante au son fondamental d'un tuyau ouvert a une longueur égale à celle du tuyau, il en résulte que *l'onde* correspondante au son fondamental d'un *tuyau fermé* a une *longueur double* de celle du tuyau. Daniel Bernouilli explique ce fait en admettant que le mouvement du son va se réfléchir sur le fond du tuyau et revient vers l'embouchure; cette hypothèse explique aussi comment le son 3 est le premier qui puisse succéder au son fondamental; car si l'on divise la longueur du tuyau en trois parties égales, *Fig.* 58, E T, T T′, T′ F, on pourra considérer les deux premiers tiers E T′ comme formant un tuyau ouvert, qui vibre à l'unisson du tuyau fermé T′ F, formé par le troisième tiers, et le son produit est évidemment le son 3, puisque E T′ est le tiers en longueur du tuyau ouvert qui donnerait le son fondamental, et T′ F aussi le tiers du tuyau fermé E F. S'il en est ainsi, le deuxième son du tuyau fermé E F doit être le même que le son fondamental d'un tuyau fermé dont la longueur serait T′ F ou E T; en effet lorsqu'on enfonce le piston jusqu'en T on retombe exactement sur le deuxième son qui était produit lorsque le piston était en F. Il en résulte donc que, pendant les vibrations qui donnent le deuxième son, la couche d'air T reste dans le même état que s'il y avait là un fond fixe, c'est-à-dire, qu'elle n'éprouve point d'oscillations;

elle forme alors ce qu'on appelle un *nœud*, parce qu'en réalité elle reste immobile. Ainsi pour le deuxième son d'un tuyau fermé, il y a dans la longueur de ce tuyau deux *ventres* et deux *nœuds;* le premier ventre est à l'embouchure E, le deuxième est aux deux tiers de la longueur en T', et le premier nœud est au premier tiers en T; le deuxième est au fond du tuyau en F.

Pour le troisième son qui est le son 5, il y a 3 ventres et 3 nœuds : le premier ventre est toujours à l'embouchure, le deuxième aux $\frac{2}{5}$ et le troisième aux $\frac{4}{5}$; le premier nœud est à $\frac{1}{5}$, le deuxième à $\frac{3}{5}$ et le troisième à $\frac{5}{5}$, c'est-à-dire, au fond.

De même pour le son 7 il y a 4 ventres et 4 nœuds; pour le son 9, 5 ventres et 5 nœuds, etc.

On peut vérifier, par l'expérience, le lieu et l'existence de tous les ventres et de tous les nœuds correspondans à un son quelconque; pour cela il suffit de faire des ouvertures en tous les points que nous venons de désigner comme appartenant aux ventres, le son ne sera pas changé; et l'on pourra aussi, au moyen de la tige T du piston P, *Fig.* 57, pousser ce piston dans tous les points que nous venons de désigner comme appartenant aux nœuds, le son n'en recevra non plus aucune altération, il restera le même pour toutes ces positions du piston.

Il résulte de tout ce qui précède que, pour monter une gamme avec des tuyaux ouverts ou fermés en tirant seulement leur son fondamental, il suffira de prendre 7 tuyaux ouverts dont les longueurs soient entre elles comme les nombres 1, $\frac{8}{9}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{8}{15}$, $\frac{1}{2}$, ou 7 tuyaux fermés dont les longueurs soient dans le même rapport. L'expérience semble en ce point s'écarter un peu de la théorie, car des tuyaux qui auraient exactement les rapports précédens donneraient une gamme fausse; mais cela tient à ce que la colonne d'air éprouve près de l'embouchure des mouvemens très-compliqués, et il suffit d'alté-

rer très-peu les proportions précédentes pour avoir une gamme parfaitement juste.

Lorsqu'on fait vibrer ensemble deux tuyaux qui donnent des sons très-rapprochés, comme, par exemple, l'ut et l'ut dièse, on entend à de petits intervalles un renflement très-sensible dans le son; c'est ce phénomène remarquable que les organistes appellent le *battement*. Sauveur en a le premier donné l'explication. Lorsque nous entendons à la fois deux sons dont l'un fait 24 vibrations, tandis que l'autre en fait 25, il est évident qu'à chaque 24 vibrations du premier ou à chaque 25 vibrations du second, les ondes sonores recommencent à partir ensemble, et leurs commencemens viennent ensemble frapper l'oreille, et c'est cette coïncidence qui produit le battement. Ainsi plus les sons diffèrent entre eux, plus les battemens sont fréquens, et au contraire plus les sons approchent de se confondre et plus les battemens sont rares. Ce phénomène ne s'observe que difficilement entre les sons qui résultent des vibrations des cordes, parce qu'en général ils ont une moindre intensité; cependant Rameau en a aussi reconnu l'existence, et l'on sait tout le parti qu'il en a su tirer pour fonder un système de musique dont on ne parle plus guère.

481. *Lois des vibrations des lames ou des tiges.*

Une lame ou une tige qui est fixée solidement par une de ses extrémités, *Fig.* 47, et qui est frottée par un archet ou simplement écartée de sa position avec la main, exécute de L en L′ une série de vibrations isochrones qui deviennent, si elles sont assez rapides, de véritables vibrations sonores. Daniel Bernouilli a déterminé par la théorie la loi de ces vibrations; il a démontré que pour une même lame, à laquelle on donne successivement diverses longueurs vibrantes, les nombres de vibrations exécutées dans le même temps sont en raison inverse des carrés de ces longueurs.

Cette loi s'applique aux tiges cylindriques ou prismatiques et aux lames, quelle que soit la nature de leur substance; il est nécessaire seulement qu'il y ait homogénéité des matières et égalité de largeur et d'épaisseur dans toute leur étendue.

Cette loi peut être vérifiée par l'expérience; il suffit pour cela de fixer sur la table d'une caisse sonore, des tiges de fer ou de laiton, par exemple, des fils de 1 ou 2 lignes de diamètre coupés au même bout, et de leur donner des longueurs qui soient entre elles comme les nombres 1, $\sqrt{\frac{8}{9}}$, $\sqrt{\frac{4}{5}}$, $\sqrt{\frac{3}{4}}$, $\sqrt{\frac{2}{3}}$, $\sqrt{\frac{3}{5}}$, $\sqrt{\frac{8}{15}}$, $\sqrt{\frac{1}{2}}$. Les sons résultans formeront une gamme juste.

C'est là précisement ce qui se trouve réalisé dans l'instrument que l'on appelle *le violon de fer*, qui est représenté dans la *Fig.* 63, vu en dessus et vu de face; on lui donne cette forme arrondie afin que l'archet ne touche qu'une tige à la fois.

Une seule tige peut comme un seul tuyau produire une série de sons différens, par divers modes de vibration. Le mode que nous venons de considérer donne le son fondamental, les modes suivans offrent successivement 1, 2, 3 nœuds de vibration et donnent des sons de plus en plus aigus. Chladni a démontré par l'expérience que le son fondamental étant représenté par 4, le deuxième son correspondant à 1 nœud de vibration est représenté par 2^5; et que si celui-ci est représenté par 3^2, les suivans pour 2 nœuds, 3 nœuds, etc., se trouvent représentés par la série des nombres 5^2, 7^2, 9^2, etc.

482. *Loi des vibrations de la sirène.* Cet instrument a reçu de son inventeur, M. Cagniard de la Tour, le nom de *sirène*, parce qu'il a, comme nous le verrons plus tard, la

propriété d'exciter directement des vibrations sonores dans l'eau et dans les divers fluides. Nous allons d'abord examiner sa construction et les vibrations qu'il produit dans l'air.

T T′ F F′, *Fig.* 70. Boîte cylindrique en cuivre, de 2 ou 3 pouces de diamètre et d'environ 1 pouce de hauteur; la surface supérieure de la table T T′ est plane et très-bien polie.

S S′, ouverture percée au milieu du fond F F′.

Y Y′, tuyau *porte-vent* qui se visse ou s'ajuste dans l'ouverture S S′.

V, ouvertures percées dans la table T T′; elles sont disposées circulairement et équidistantes entre elles, *Fig.* 69; on en peut faire 10, par exemple, et on leur donne de telles dimensions que les intervalles pleins qui les séparent aient un peu plus de largeur que les ouvertures elles-mêmes.

P P′, plateau mobile dont la surface inférieure s'applique exactement sur la table, sans cependant exercer de frottement sensible.

X, axe autour duquel le plateau P P′ peut tourner d'un mouvement plus ou moins rapide.

U, ouvertures percées dans le plateau P P′, et exactement correspondantes aux ouvertures V de la table, par leur nombre, leur position et leurs distances respectives, *Fig.* 69. Ainsi toutes les ouvertures de la table sont ouvertes à la fois ou fermées à la fois, suivant que la rotation du plateau amène sur elles les ouvertures V ou les intervalles pleins qui séparent ces ouvertures.

I, vis sans fin qui se trouve vers la partie supérieure de l'axe de rotation X.

R R′, roue de 100 dents que la vis sans fin met en mouvement.

C C′, roue indépendante qui ne passe qu'une dent pour chaque révolution de la roue R R′; c'est un bras fixé à l'axe de R R′ qui vient la pousser d'un cran.

Les axes de ces roues portent des aiguilles qui parcourent des cadrans divisés D et D′, *Fig.* 68; ces aiguilles et les

roues qui les mettent en mouvement forment le *compteur* de la sirène. On peut à volonté faire marcher le compteur ou l'arrêter ; pour cela il suffit de presser le bouton B pour faire engréner la roue R R′ avec la vis sans fin, ou le bouton B′ pour désengréner ; dans ce dernier cas les dents de cette roue vont heurter contre un arrêt qui amortit immédiatement la vitesse acquise.

Nous devons ajouter encore que les ouvertures du plateau sont inclinées aux faces, *Fig.* 59, de telle sorte que la vitesse du vent qui est poussé dans la boîte par le porte-vent suffit pour imprimer au plateau un mouvement de rotation de plus en plus rapide.

Cela posé, pour comprendre le jeu de la sirène comme instrument d'acoustique, imaginons pour un moment qu'il n'y ait qu'un seul trou dans la table et 10 dans le plateau. Alors, pendant une révolution du plateau le trou de la table sera 10 fois ouvert et 10 fois fermé, et par conséquent l'écoulement de l'air qui arrive par le porte-vent, aura lieu 10 fois et sera 10 fois arrêté. Cet effet se produira dans 1″ ou dans 1″/10 ou dans 1″/100 suivant que le plateau fera 1 tour, 10 tours ou 100 tours par seconde ; et comme l'air qui est vivement poussé et brusquement arrêté produit à chaque alternative une vibration, il en résulte que l'on aura de la sorte 20 vibrations pour chaque tour du plateau, et par conséquent 20, 200 ou 2000 vibrations par seconde. Ainsi la sirène doit rendre des sons qui montent par degrés, ou plutôt par nuances insensibles depuis le plus grave jusqu'au plus aigu. Et c'est en effet ce que l'expérience confirme. Maintenant si au lieu de supposer, comme nous l'avons fait, un seul trou dans la table, on suppose qu'il y en ait 10 comme dans le plateau, on aura seulement un son 10 fois plus intense, car chaque trou produira son effet comme s'il était seul.

Le nombre, la forme et la grandeur des trous paraissent avoir sur le *timbre* du son une influence dont jusqu'à

présent on ne s'est rendu compte que par des considérations trop peu rigoureuses pour qu'il nous soit permis de les développer; il en est de même des divers effets que l'on obtient en laissant entre les trous des intervalles pleins plus ou moins grands; seulement M. Cagniard de la Tour pense que si les intervalles pleins sont très-petits le son se rapproche de la voix humaine, et que s'ils sont très-grands le son se rapproche de celui de la trompette. Enfin l'épaisseur de la table et celle du plateau doivent aussi imprimer aux sons des caractères particuliers qui sont encore trop peu étudiés.

On voit par les notions précédentes qu'il ne faudrait pas songer à faire de la sirène un instrument de musique; mais elle est un instrument d'acoustique très-ingénieux et qui peut servir à résoudre une foule de questions fondamentales sur la théorie du son et sur les phénomènes physiques qui en dépendent.

483. *Détermination d'un son fixe ou du nombre absolu des vibrations qui correspondent à un son donné.*

On peut compter le nombre absolu des vibrations qui correspondent à un son quelconque, au moyen de la sirène, au moyen des lames, des tuyaux et des cordes.

1° Supposons, par exemple, que l'on se propose de déterminer au moyen de la sirène le nombre des vibrations qui correspondent au son du *diapason* dont on se sert pour accorder les instrumens de musique. Pour cela on devra mettre sur la table du soufflet, *Fig.* 60, un tuyau ouvert ou fermé dont le son fondamental soit à l'unisson du diapason; ensuite à côté de ce tuyau on mettra le tuyau porte-vent de la sirène, et en modifiant sans cesse la pression de l'air du soufflet avec la tige tt', on parviendra à mettre la sirène à l'unisson avec le tuyau voisin, et à soutenir cet unisson pendant quelques minutes. Lorsqu'on sera exercé à produire et à maintenir cet unisson avec une grande exactitude, il faudra à un instant donné, pendant

que les sons se produisent, presser à la fois le bouton du compteur de la sirène pour faire engrener la roue et le bouton d'un bon chronomètre pour mesurer le temps; ensuite après avoir écouté l'accord attentivement pendant 2′ environ, il faudra arrêter à la fois le compteur et le chronomètre. On aura ainsi par le compteur le nombre des vibrations, et par le chronomètre le temps qui s'est écoulé; ce qui permettra de déduire aisement combien il y a eu de vibrations en 1″. Dans quelques-unes de ses expériences M. Cagniard de la Tour avait imaginé de placer la sirène sur un gazomètre et de maintenir l'uniformité du mouvement par des volans diversement combinés; mais le moyen précédent me semble plus simple et plus sûr. Au reste, on trouve toujours à peu près le même résultat, savoir : que le *la* du diapason ordinaire correspond à 427 vibrations par seconde.

2° Pour compter le nombre absolu des vibrations au moyen des tiges ou des lames, M. Chladni dispose l'expérience de la manière suivante : il choisit une lame de laiton bien homogène d'une demi-ligne d'épaisseur et d'un demi-pouce de largeur; il la pince dans un étau bien fixe, *Fig.* 47, en lui donnant au dehors un longueur telle qu'elle fasse 4 vibrations en 1″. Ces vibrations sont assez lentes pour être comptées avec exactitude pendant plusieurs minutes. Alors on desserre la lame après en avoir mesuré la longueur avec précision et on l'enfonce dans l'étau de manière à diminuer de plus en plus sa longueur vibrante, jusqu'à ce qu'elle soit, par exemple, à l'unisson du diapason; alors on en mesure de nouveau la longueur, et par la comparaison de cette deuxième expérience avec la première, on en déduit le nombre des vibrations d'après la loi que nous avons donnée précédemment (480), savoir : que les nombres des vibrations sont en raison inverse des carrés des longueurs.

Le son est plus soutenu et plus facile à comparer lors-

qu'on l'obtient avec un archet, mais il faut avoir grande attention de faire vibrer la lame dans toute sa longueur sans y déterminer de nœuds de vibrations.

3° Le *battement* des tuyaux (page 122) fut employé par Sauveur à déterminer un son fixe, à une époque où l'on ne connaissait encore ni les lois des vibrations des cordes, ni celles des vibrations des lames. Il fallait sans doute un génie bien pénétrant pour analyser ce phénomène, l'expliquer et en faire en même temps une si heureuse application. Imaginons avec Sauveur, que l'on ait trois tuyaux de plusieurs pieds de longueur et qu'on les accorde de manière que le premier donne, avec le deuxième, la tierce *ut mi*, et avec le troisième la tierce mineure *ut mi♭*. Alors le nombre des vibrations de ut étant 1 ou $\frac{20}{20}$, celui de mi sera $\frac{5}{4}$ ou $\frac{25}{20}$, et celui de mi♭ $\frac{5}{4} \times \frac{24}{25} = \frac{24}{20}$. Ainsi pendant que ut fera 20 vibrations, mi♭ en fera 24 et mi 25. Or si l'on fait résonner ensemble le mi et le mi♭, on entend des battemens très-prononcés et assez distans pour que l'on puisse les compter pendant plusieurs minutes. Supposons que l'on en compte 480 en 2′, ce sera 4 battemens par seconde, c'est-à-dire qu'à chaque seconde, le mi et le mi♭ se rencontrent 4 fois; mais il faut évidemment 25 vibrations de mi et 24 de mi♭ pour faire une rencontre; donc mi fera 100 vibrations par seconde et mi♭ seulement 96, et par conséquent ut n'en fera que 80. Tels sont dans cette hypothèse les nombres de vibrations correspondans à ces sons; il suffira ensuite de connaître le rang qu'ils occupent dans le clavier pour en déduire les nombres absolus de vibration de tous les sons.

4° Le P. Mersenne avait essayé de déterminer le nombre de vibrations des sons au moyen des cordes, mais on ne connaissait pas alors la formule générale de Taylor qui établit une relation entre la durée des oscillations, la longueur de la corde, sa nature et sa tension. Cette formule est la suivante :

$$N^2 = \frac{g\,P}{c\,L}.$$

N, nombre des vibrations en 1″ sexagésimale.
g, gravité ou $9^{mèt.},8088$.
P, poids qui tend la corde.
L, longueur de la corde.
c, poids de la longueur L de la corde.

On voit d'après cela que pour trouver par le calcul le nombre des vibrations que fait une corde lorsqu'elle rend un son quelconque, il suffit de connaître le poids P qui lui donne sa tension, et la distance L des deux chevalets; pour la valeur de c, on la déduira aisément après avoir pesé une longueur arbitraire de la corde. En substituant ces nombres dans la formule on aura le carré du nombre des vibrations exécutées en 1″.

On trouve dans les mémoires de l'Académie de Berlin, pour 1822 et 1823, les résultats de plusieurs expériences faites de cette manière avec beaucoup de soin par M. Fischer. Voici les nombres auxquels il est parvenu pour les diapasons de différens orchestres.

Diapason du théâtre de Berlin 437,32 vibrations en 1″.
— grand opéra français 431,34
— Feydeau. 427,61
— théâtre Italien. . . 424,17.

On a coutume d'appeler ut_1 l'ut du violoncelle, et re_1, mi_1, etc., la gamme que l'on obtient en le prenant pour point de départ; puis ut_2, mi_2, etc., la gamme qui forme l'octave aiguë de la première; ut_3, mi_3, etc., celle qui forme l'octave de la deuxième; etc.

Comme le *la* du diapason est un la_2, il en résulte qu'à Berlin le *la* du violoncelle fait $\frac{437,32}{2} = 218,66$ vibrations en 1″, et comme le nombre des vibrations de l'ut est les $\frac{3}{5}$ de celles du la, il en résulte que l'ut du violoncelle fait à Berlin 128,2 vibrations en 1″, tandis qu'au théâtre

Italien il ne fait que 127,23 vibrations ; c'est une vibration de moins.

La voix d'homme s'étend en général du sol_1 au fa_3, et celle de femme du re_3 au la_4 :

Sol_1 correspond à $127{,}2 . \frac{3}{2} . = 190{,}8$ vibrations en $1''$.

Fa_3 . . . . . à $127{,}2 . \frac{4}{3} . 4 = 678{,}4$

$Ré_3$ . . . . . à $127{,}2 . \frac{9}{8} . 4 = 572{,}4$

La_4 . . . . . à $127{,}2 . \frac{5}{3} . 8 = 1606$.

Ainsi la voix d'homme fait 190 vibrations par seconde pour le son le plus grave et 678 pour le son le plus aigu, et la voix de femme 572 vibrations pour le son le plus grave et 1606 pour le son le plus aigu. Au théâtre de Berlin le la_4 correspond à 1707 vibrations ; c'est par conséquent 100 vibrations par seconde de plus qu'au théâtre Italien. La plupart des voix peuvent s'élever de beaucoup au-dessus du la_4, et il n'y a sans doute pas d'exagération à supposer que la voix humaine puisse exécuter souvent plus de 3 ou 4 mille vibrations par seconde.

Les sons les plus aigus que nous puisions entendre, ceux qui résultent, par exemple, du mouvement des ailes de certains insectes, s'élèvent sans doute à plus de 12 ou 15 mille vibrations par seconde. Or il est bien probable que la membrane du tympan se met à l'unisson avec le son quelle entend, et qu'ainsi elle est capable d'exécuter en $1''$, depuis les 32 vibrations qui forment le son le plus grave jusqu'aux 12 ou 15 mille vibrations qui forment le plus aigu des sons perceptibles.

484. *De la longueur absolue des ondes sonores.* Pour déterminer la longueur absolue des ondes sonores dans un

milieu quelconque, il suffit de connaître la vitesse avec laquelle le son se propage dans ce milieu et le nombre des vibrations qui produisent le son. Dans l'air, par exemple, la vitesse du son étant de 340 mètres par seconde, il est évident qu'un son qui résulterait de 340 vibrations par seconde donnerait des ondulations de 1 mètre de longueur; car chaque vibration excite une onde, et les 340 ondes qui sont excitées en 1″ occupent précisément 340 mètres de longueur. On voit donc qu'en général la longueur de l'onde est le quotient de la vitesse du son par le nombre des vibrations. Ainsi la longueur de l'onde que donne l'*ut* du violoncelle du théâtre Italien est $\frac{340}{127,23} =$ 2mèt.,6 ou 8 pieds à très-peu près. Ainsi l'ut du violoncelle se trouve à l'unisson avec un tuyau ouvert de 8 pieds ou avec le bourdon de 4 pieds, comme l'indique la théorie de Bernouilli (480).

La longueur de l'onde qui correspond au la_4 est $\frac{340}{1606} =$ 0,21 ou environ 8 pouces. Et celle qui correspond au la_7 serait de 1 pouce; c'est déjà un son excessivement aigu, mais il paraît cependant que l'on peut encore le regarder comme un son musical.

CHAPITRE III.

Vibrations des corps solides.

485. *Vibrations des corps dont deux dimensions sont petites par rapport à la troisième. Tubes, verges cylindriques, verges prismatiques, etc.*

Nous avons déjà vu (481) que les lames, les tiges ou les cylindres peuvent éprouver des vibrations rapides et exciter des ondes sonores lorsqu'on les ébranle perpendiculairement à l'axe; ces vibrations dont les lois sont assez simples, se nomment *vibrations transversales*. Nous allons maintenant considérer les *vibrations longitudinales*, c'est-à-dire, celles que l'on peut exciter dans les tubes, les verges, les cordes, etc., en imprimant à leurs molécules des vitesses parallèles à l'axe.

Supposons, par exemple, que l'on prenne un tube de verre d'environ deux mètres de longueur et de trois ou quatre centimètres de diamètre, et qu'en le soutenant d'une main juste en son milieu, on exerce de l'autre main, sur l'une de ses moitiés, une légère friction avec un morceau de drap mouillé, à l'instant on entendra un son, et avec un peu d'exercice on parviendra à lui donner beaucoup d'éclat et de pureté. Les vibrations que l'on détermine ainsi sont évidemment des vibrations longitudinales. En frottant toujours de la même manière par un mouvement de va et vient, mais avec plus ou moins de vitesse et en pressant plus ou moins, on pourra produire une série de sons différens, et si l'on représente par 1 le premier son de la série, c'est-à-dire le plus grave, il sera

facile de constater que les autres sont représentés par la suite des nombres naturels 2, 3, 4, etc. Il faudra déjà beaucoup d'habitude et d'habileté pour faire sortir le son 4 quand le tube n'aura que deux mètres de longueur, comme nous l'avons supposé.

On obtiendra les mêmes résultats avec de longues lames prismatiques de verre, ou avec des cylindres pleins de la même substance, et aussi avec des tubes, des lames et des cylindres de bois ou de métal. Seulement pour ces derniers il sera souvent plus commode d'adopter un autre mode d'ébranlement : au lieu de frotter avec du drap mouillé, on pourra frotter avec du drap enduit de résine : ou, ce qui sera plus sûr encore, ce sera de fixer avec du mastic ou de la cire à cacheter, à l'une des extrémités des cylindres ou des lames et sur le prolongement de leur axe, un petit tube de verre creux ou plein, d'environ un décimètre de longueur et de 5 ou 6 millimètres de diamètre ; c'est alors ce tube auxiliaire qui sera ébranlé avec du drap mouillé, et si le mastic ou la cire ont été bien fondus et établissent une continuité parfaite, les vibrations se communiqueront sans peine.

Ainsi quand les verges droites sont soutenues au milieu et libres à leurs extrémités, elles vibrent comme les tuyaux ouverts, et *rendent des sons qui suivent la série des nombres naturels* 1, 2, 3, 4, etc.

Il est facile de s'assurer par l'expérience que *des verges de même substance sont toujours à l'unisson pour leur son fondamental quand elles ont la même longueur*, quelle que soit leur largeur ou leur épaisseur ; pourvu toutefois que ces deux dimensions restent toujours petites par rapport à la troisième. Ainsi toutes les verges de verre de 6 pieds de longueur donneront le même son, qu'elles soient minces ou épaisses et qu'elles soient travaillées en lames, en tubes ou en cylindres. Mais, à égalité de longueur, des verges de diverses substances donneront des sons différens.

On remarquera cependant que des verges très-longues donneront le son 2 ou le son 3 plus facilement que le son fondamental. Ces résultats complètent l'analogie que nous venons de remarquer entre les vibrations des verges libres à leurs extrémités et celles des tuyaux ouverts.

Pendant que ces masses solides sont en vibration, le mouvement se distribue très-inégalement dans toutes leurs molécules; la plupart d'entre elles font des excursions plus ou moins grandes; et il y en a au contraire, mais en petit nombre, qui restent toujours en repos. La série des points de repos forme sur la surface, des lignes que l'on nomme *lignes nodales;* et nous allons faire voir, d'après les ingénieuses observations de M. Savart, que, dans les vibrations dont il s'agit, les lignes nodales tracent, autour des tubes et des cylindres, des courbes à peu près semblables *aux hélices*, c'est-à-dire *aux filets d'une vis*, et que les courbes plus irrégulières qu'elles tracent autour des lames prismatiques semblent imiter encore des hélices plus ou moins imparfaites.

Supposons d'abord que l'on expérimente sur un long tube de verre dont on tire seulement le son fondamental: on tient ce tube à peu près horizontalement; sur celle de ses moitiés qui n'est pas frottée avec le drap mouillé on passe un anneau en papier très-léger (*Fig.* 64), ayant, par exemple, un diamètre double ou triple de celui du tube, et l'on observe les mouvemens de cet anneau qui est analogue aux petits chevrons de papier dont Sauveur faisait usage pour montrer les nœuds des cordes vibrantes (479). Aussitôt que le son se fait entendre l'anneau glisse sur la surface du tube avec une grande vivacité et s'arrête enfin en un certain point auquel il revient sans cesse quand on l'en écarte. On marque ce point avec de l'encre; il fait évidemment partie de la ligne nodale. Ensuite on fait un peu tourner le tube dans la main, pour amener en-dessus une autre arête sur laquelle repose l'anneau, et l'on re-

commence les vibrations ; on voit encore l'anneau qui glisse et s'arrête ; ce qui donne un second point de la ligne nodale que l'on marque comme le premier. En continuant de tourner le tube peu à peu et dans le même sens, on peut successivement marquer tous les points de la ligne nodale, et l'on démontre ainsi qu'elle forme une espèce d'hélice dont le pas est très-allongé et qui fait plusieurs révolutions autour du tube. C'est ce que nous avons essayé de représenter dans la figure 64. En retournant le tube pour mettre l'anneau sur son autre moitié, on y retrouve une courbe toute pareille, avec cette circonstance singulière que l'une de ces courbes n'est pas la continuation de l'autre, mais que toutes deux semblent partir du milieu et s'enrouler dans le même sens.

Il arrive quelquefois, mais rarement, que l'hélice, après avoir tourné dans un sens, par exemple de droite à gauche, se retourne subitement dans le sens contraire ou de gauche à droite ; et quand cet accident se manifeste sur l'un des bouts du tube, ou plutôt sur l'une de ses moitiés, il se manifeste sur l'autre, à peu près à la même distance de l'extrémité.

La surface intérieure du tube présente une ligne nodale tout-à-fait pareille à celle que nous venons de tracer sur la surface extérieure ; mais *ces deux lignes sont diamétralement opposées*, c'est-à-dire, que si l'on conçoit le tube, coupé en deux parties égales parallèlement à l'axe (*Fig.* 65), et qu'il se trouve, par exemple, deux points de la ligne nodale U,U′ sur l'arête extérieure qui est *en dessus*, il y aura deux points de repos correspondans B,B′ sur l'arête intérieure qui est *en dessous* ; et réciproquement les deux points de repos O,O′ de l'arête extérieure qui est en dessous se retrouveront verticalement en H,H′ sur l'arête intérieure qui est en dessus.

Pour constater la trace de la ligne nodale intérieure, M. Savart met dans le tube bien desséché, un peu de sable

dont les grains soient pareillement très-secs et assez gros, ou bien une petite balle de liége ou de cire. Le sable ou les balles présentent souvent dans ces expériences des mouvemens de rotation singuliers qui dépendent de l'opposition des vitesses de part et d'autre de la ligne nodale.

Lorsqu'au lieu de tirer d'un tube le son fondamental on tire les sons 2, 3 ou 4, on retrouve encore des lignes nodales analogues aux précédentes; seulement pour le son 2 il y a toujours *deux renversemens* dans la direction de l'hélice: c'est-à-dire qu'en partant de l'une des extrémités du tube, l'hélice tourne, par exemple, de droite à gauche jusqu'au premier quart de la longueur environ; là elle se renverse pour tourner de gauche à droite jusqu'au troisième quart; et là enfin elle se renverse encore pour tourner, comme elle faisait d'abord, de droite à gauche. Pour le son 3 il y *trois renversemens;* le premier au premier sixième de la longueur, le deuxième au troisième sixième et le troisième au cinquième sixième. Pour le son 4, *quatre renversemens;* savoir au premier huitième de la longueur, au troisième huitième, au cinquième huitième, et au septième huitième.

Les lignes nodales des lames et des verges prismatiques ne sont ni aussi simples ni aussi faciles à tracer. En projetant du sable sur une lame longue et étroite, on le verra pendant les vibrations longitudinales glisser vivement, et s'accumuler en certaines positions où il formera des lignes droites perpendiculaires aux arêtes, c'est-à-dire exactement transversales (*Fig.* 84); et quand on retourne cette lame pour amener *en dessus* la surface qui était *en dessous*, l'on obtient encore un résultat analogue; mais les nœuds de cette face, au lieu de correspondre à ceux de la première, se trouvent précisément opposés (*Fig.* 88). Cette opposition est mieux marquée par la figure 89, qui représente une coupe de la lame dans laquelle les nœuds de la

face inférieure sont représentés comme on les obtient quand cette face est en dessus.

Lorsqu'une lame est assez épaisse pour que l'on puisse observer ce qui se passe sur sa tranche, on reconnaît à peu près la disposition de ligne nodale qui est représentée dans la figure 67. Tel est du moins le résultat auquel M. Savart a été conduit dans une de ses expériences. La lame sur laquelle il opérait, était une barre de fer carrée, d'un mètre de longueur et de deux centimètres de côté. Les vibrations étaient imprimées en frappant de petits coups de marteau contre l'une des extrémités. Et l'on voit sur les tranches des lignes nodales serpentantes qui vont établir une liaison entre les nœuds opposés des faces supérieures et inférieures.

Enfin quand la largeur des lames est un peu grande relativement à l'épaisseur, les lignes droites transversales disparaissent sur les faces supérieures et inférieures, ou plutôt elles se contournent, de manière à présenter à l'œil une toute autre apparence. La figure 66 est celle que l'on obtient avec une lame de 4 ou 5 centimètres de largeur et de quelques millimètres d'épaisseur seulement. Les traits ponctués marquent la forme et la position de la ligne nodale que donne la face inférieure quand elle est en dessus, et il n'y a aucun doute que cette ligne nodale ne se produise en dessous pendant que l'on observe en dessus la ligne nodale qui est marquée par les traits pleins.

Lorsque les verges dont nous venons de parler sont *fixées par un bout*, soit qu'elles se trouvent *pincées* dans un étau ou *encastrées* dans une masse solide, elles peuvent encore entrer en vibrations longitudinales et produire des phénomènes analogues aux précédens.

La série des sons qu'elles donnent alors est représentée par la suite des nombres 1, 3, 5, etc., comme celle des tuyaux fermés par un bout. Quant à leurs lignes nodales

elles sont, à quelques modifications près, les mêmes que celles des verges libres.

Enfin l'on peut fixer les verges à leurs deux extrémités, en les scellant dans des pièces solides et tout-à-fait immobiles; les sons qu'elles produisent, les lignes nodales qu'elles présentent dans ces circonstances semblent ne différer en rien des sons et des lignes nodales que l'on obtient d'elles quand elles sont libres. Ces sortes d'expériences, qui sont en général très-difficiles, deviennent simples et faciles lorsqu'on les fait sur des cordes d'instrument.

La figure 85 représente une corde ordinaire qui est disposée pour entrer en vibrations longitudinales.

BB′, règle en bois forte et épaisse.

AA′, tige d'acier solidement fixée dans la règle BB′.

CC′, corde vibrante; elle s'attache à la tige AA′ par un nœud coulant, et elle passe sur le chevalet H pour aller se fixer à la clef F, qui sert à la tendre plus ou moins.

On frotte la tige AA′ vers son extrémité supérieure, avec un archet qu'il faut avoir soin de tenir exactement parallèle à la corde, alors celle-ci entre en vibration d'une manière très-sensible. Si l'on met sur sa longueur de petits chevrons ou de petits anneaux de papier, et si l'on retourne l'appareil sur lui-même jusqu'à mettre la corde en dessous, il est facile de constater que, même sur un cylindre de si petites dimensions, il se forme encore une ligne nodale en hélice, comme dans les expériences précédentes.

Outre les vibrations transversales et longitudinales, les verges droites peuvent exécuter encore des *vibrations normales* et des *vibrations tournantes*. Ces dernières ne peuvent être excitées que dans les verges qui sont fixées par un bout; pour cela, Chladni se contente de passer l'archet très-légèrement sur une section perpendiculaire à leur axe, en prenant toutes les précautions nécessaires pour ne pas exciter les vibrations transversales dont nous avons

parlé (481); ce mouvement de l'archet imprime à la verge une sorte de torsion qui va et revient assez rapidement pour produire des ondes sonores. Les *vibrations normales* se trouvent toujours mêlées aux vibrations longitudinales, et avec une telle complication, que le calcul doit venir au secours de l'expérience pour distinguer nettement ce qui appartient à chacune. Mais il nous suffira d'indiquer ici ces deux derniers modes de vibrations, pour faire comprendre qu'ils sont essentiellement liés aux deux premiers, et qu'ils dépendent comme eux de l'élasticité de la matière, tellement, que l'un de ces modes étant connu, les trois autres s'en déduisent nécessairement. Si la science n'est pas encore parvenue à établir cette dépendance d'une manière générale et complète, elle peut du moins, dans quelques cas particuliers, déterminer certains modes de vibrations quand d'autres sont donnés. Voici sur ce point curieux quelques résultats que l'on doit à M. Poisson. (*Mémoire sur l'équilibre et le mouvement des corps élastiques.*)

1° Le carré du nombre des vibrations longitudinales d'une corde est au carré du nombre de ses vibrations transversales dans le même temps, comme sa longueur est à l'allongement qu'elle a éprouvé par la tension qu'elle supporte.

$$\text{Ou. . . . . } \frac{N'^2}{N^2} = \frac{L}{A}$$

L, longueur de la corde qui vibre d'abord longitudinalement, et ensuite, transversalement.

A, allongement que cette corde a éprouvé, en vertu de la tension qu'elle supporte.

N', nombre des vibrations longitudinales qu'elle exécute dans un certain temps.

N, nombre des vibrations transversales qu'elle exécute dans le même temps.

2° Lorsqu'une verge est encastrée par une de ses extrémités, et qu'elle exécute successivement des vibrations longitudinales et des vibrations tournantes, on a

$$\frac{N^2}{N'^2} = \frac{5}{2}$$

N est le nombre des vibrations longitudinales.

N', ... tournantes.

Ainsi, le rapport est indépendant de la longueur et de l'épaisseur.

3° Lorsqu'une verge cylindrique est libre par ses deux bouts, le nombre des vibrations longitudinales qu'elle accomplit dans un certain temps, est au nombre des vibrations transversales qu'elle accomplit dans le même temps, comme 100 fois sa longueur est à 356 fois son rayon;

Ou. . . . . $\frac{N}{N'} = \frac{100\ L}{356\ R}$

L, longueur de la verge cylindrique; R, son rayon; N, nombre des vibrations longitudinales; N', nombre des vibrations transversales. Les nombres N et N' se rapportent au son fondamental de chaque genre de vibration.

4° En appliquant la proposition précédente à une verge parallélipipédique de longueur L, dont l'épaisseur est représenté par E, on a

$$\frac{N}{N'} = \frac{100\ L}{206\ E}$$

Ces deux dernières propositions ont été vérifiées par des expériences de M. Savart. Mais comme une verge doit être longue pour donner un son fondamental facile à apprécier, lorsqu'elle vibre longitudinalement, et que c'est le contraire quand elle vibre transversalement, il est nécessaire d'employer deux verges pour faire la com-

paraison; par exemple, une verge de 1 mètre pour les vibrations de la première espèce, et une autre de $\frac{1}{8}$ de mètre pour celles de la seconde espèce. Ayant trouvé que la verge de 1 mètre fait 1000 vibrations longitudinales, on saura bien par ce que nous avons dit précédemment, que, si l'on pouvait apprécier le son que produit une verge de même matière et de $\frac{1}{8}$ de mètre, il correspondrait à 8000 vibrations. C'est ainsi que les valeurs de N ont été déduites pour former le tableau suivant.

1° Verge parallélipipédique en cuivre jaune.

$L = \frac{1}{8}(0^m,825)$, $E = 3^{mm},92$ $N = 34133$

Le calcul donne. . . . $N' = 2668$

L'observation a donné. $N' = 2667$

Différence . . . . . $+1$

2° Verge cylindrique en cuivre jaune.

$L = \frac{1}{8}(0^m,825)$, $R = 2^{mm},4$ $N = 34133$

Le calcul donne. . . . $N' = 2829$

L'observation a donné. $N' = 2844$

Différence . . . . — 15

3° Verge cylindrique en cuivre rouge.

$L = \frac{1}{8}(0^m,825)$, $R = 1^{mm},7$ $N = 36864$

Le calcul donne. . . . $N' = 2164$

L'observation a donné. $N' = 2133$

Différence . . . . $+31$

4° Verge cylindrique en fer.

$L = \frac{1}{8}(0^m,88)$, $R = 2^{mm},5$ $N = 45514$

Le calcul donne. . . . $N' = 3683$

L'observation a donné. $N' = 3686$

Différence. . . . . — 3

5° Verge parallélipipédique en verre.

$L = \frac{1}{8}(0^m,967)$, $E = 6^{mm},4$ $N = 42667$

Le calcul donne. . . . $N' = 4645$

L'observation a donné. $N' = 4608$

Différence . . . . $+37$

6° Verge parallélipipédique en verre.

$L = \frac{1}{8}(0^m,967)$, $E = 2^{mm},6$ $N = 42667$

Le calcul donne. . . . $N' = 1887$

L'observation a donné. $N' = 1843$

Différence . . . . $+44$

7° Verge parallélipipédique en hêtre.

$L = \frac{1}{8}(0^m,8925)$, $E = 2^{mm},8$ $N = 40960$

Le calcul donne. . . . $N' = 2114$

L'observation a donné. $N' = 2048$

Différence . . . . $+66$

On voit dans tous ces résultats un accord assez satisfaisant entre le calcul et l'observation.

Les expériences 1° et 2° font bien voir que le nombre des vibrations longitudinales ne dépend que de la longueur; et elles montrent en même temps que les vibrations transversales ne sont pas simplement proportionnelles à l'épaisseur, puisqu'alors la deuxième valeur de N', déduite de la première, serait 3265 au lieu de 2844. La théorie de M. Poisson indique, en effet, que ces vibrations sont modifiées par la forme, et que, toutes choses égales d'ailleurs, il faut multiplier les vibrations parallélipipédiques par $\sqrt{\frac{3}{4}}$ pour obtenir les vibrations cylindriques. Aussi, en multipliant 3265 par $\sqrt{\frac{3}{4}}$, ob-

tient-on 2828 qui diffère très-peu de 2829, résultat de l'expérience directe.

Dans les expériences 5° et 6°, l'influence de la forme a disparu, puisque les verges sont l'une et l'autre parallélipédiques, et l'on trouve en effet que les vibrations transversales sont simplement proportionnelles aux épaisseurs.

486. *Vibrations des corps dont une seule dimension est petite par rapport aux deux autres. Plaques, membranes, cloches, etc.*

Pour faire vibrer les plaques on emploie ordinairement une pince semblable à celle qui est représentée dans la figure 86. La vis T sert à fixer la pince elle-même sur une table ou sur quelque corps très-solide, et la vis P sert à presser la plaque contre un petit cylindre saillant c; les extrémités de la vis et du cylindre doivent être garnies d'un morceau conique de peau de buffle, ferme et épais. La plaque étant ainsi fixée, soit par son centre, soit par un point plus ou moins rapproché de son bord libre, on l'ébranle avec un archet qui la frotte perpendiculairement à son plan. Le son qu'elle donne est en général assez net, pour qu'on puisse en prendre le ton sur un piano ou sur quelque autre instrument.

Sans rien changer à la disposition de la plaque et presque sans modifier le mouvement de l'archet, on peut obtenir des sons très-différens, dont la série est tellement accidentelle et variable qu'il est à peu près impossible de la reproduire indentiquement la même, dans plusieurs expériences successives. Mais s'il est difficile d'énumérer et de définir les sons que peut produire une plaque fixée d'une manière quelconque, il est toujours possible de découvrir, dans tous les cas, comment se partage sa masse en *parties vibrantes* et en *lignes de repos*. Pour cela, on maintient la plaque horizontalement pendant ses vibrations, et l'on répand sur sa surface supérieure un peu de

sable sec et fin ; alors, au premier son qui est produit, le sable entre en mouvement ; il saute et retombe plusieurs fois en une seconde ; et, toujours repoussé par toutes les parties vibrantes, il va s'accumuler sur les parties immobiles, et marquer ainsi l'espace qu'elles occupent sur la plaque. Les lignes qui composent toutes les figures dessinées par le sable sont ce que l'on appelle les *lignes nodales*.

Galilée avait indiqué le premier (*Dialogues*) cet ingénieux moyen d'observer les lignes nodales ; mais on peut dire que Chladni l'a inventé de nouveau en 1787, et que, par les belles applications qu'il en a faites il a ouvert en acoustique un vaste champ de découvertes. (Chladni, *Traité d'Acoustique.*)

Nous n'entreprendrons pas de retracer ici toutes les lignes nodales qu'une même plaque peut donner ; car ces lignes paraissent être en nombre indéfini ; mais nous essaierons d'indiquer divers systèmes généraux, auxquels on peut rapporter toutes les lignes nodales des plaques circulaires, rectangulaires, triangulaires, etc.

Les plaques circulaires peuvent donner un *système diamétral*, un *système concentrique* et un *système composé*.

Le *système diamétral* est uniquement composé de diamètres qui divisent la circonférence en un nombre pair de parties égales : dans la figure la plus facile à obtenir on compte 2 diamètres, et 4 parties dans la circonférence (*Fig.* 90), ensuite 3 diamètres et 6 parties, etc.

Dans les cercles de métal qui ont 3 ou 4 décimètres de diamètre, on peut souvent compter jusqu'à 36 ou 40 parties (*Fig.* 91) ; dans la circonférence, il est facile de voir pourquoi, dans ce mode de division par lignes droites, les parties doivent être toujours égales et en nombre pair : car, 1° il est évident que toutes ces parties doivent vibrer à l'unisson, c'est-à-dire accomplir dans le même temps le même nombre d'oscillations, et puisqu'elles sont dis-

posées de la même manière, il faut bien qu'elles soient égales en étendue; 2° on peut démontrer par le raisonnement et confirmer par l'expérience que deux secteurs, ou, en général, que deux parties contiguës doivent avoir des mouvemens opposés, c'est-à-dire que l'une doit passer à droite de sa position primitive, tandis que l'autre passe à gauche et *vice versâ*; ce qui ne pourrait avoir lieu si les parties étaient en nombre impair.

Dans le *système concentrique*, toutes les lignes nodales sont des circonférences dont le centre est au centre de la plaque :

Le cas le plus simple est celui d'une seule ligne nodale, *Fig.* 92; ensuite on peut en obtenir deux, trois ou davantage, *Fig.* 93 et 94. Pour reproduire ces figures plus facilement, M. Savart prend comme Chladni des plaques d'un grand diamètre, mais il les perce au centre d'un trou circulaire de quatre ou cinq millimètres de diamètre; dans ce trou, il fait passer une mèche de crin en guise d'archet, *Fig.* 87. La plaque doit être soutenue seulement par quelques points des lignes nodales que l'on veut produire.

Dans le *système composé*, les lignes nodales sont des diamètres plus ou moins courbés et des circonférences plus ou moins altérées dans leurs contours. Les figures 95 et 96 représentent quelques-unes des formes nombreuses auxquelles on peut arriver. Pour les obtenir il faut plus ou moins d'habileté, mais le principe consiste à presser avec les doigts un ou plusieurs des points par lesquels les lignes nodales doivent passer.

Dans les plaques carrées, l'on peut distinguer aussi trois systèmes analogues aux précédens. Les *Fig.* 98, 99 et 100, rentrent dans le système diamétral.

Les *Fig.* 101, 102 et 103 rentrent dans le système concentrique.

Les *Fig.* 104, 105 et 106 forment une espèce de système composé.

Les plaques triangulaires, rectangulaires ou polygona-

les, donnent encore des formes analogues, ainsi que les plaques elliptiques.

Ces figures sont, en général, indépendantes de la nature des substances ; elles se produisent avec la même régularité sur le métal, le verre ou le bois ; mais il y a cependant une condition comme nous le verrons plus loin, c'est que l'élasticité soit la même dans tous les sens.

Les *membranes* présentent des modes de vibration tout-à-fait analogues à ceux des plaques : on peut s'en assurer avec du papier ou du parchemin, ou, ce qui vaut mieux encore, avec de la baudruche très-souple et très-égale. Seulement, il faut employer un moyen particulier pour tendre et pour ébranler ces espèces de plaques trop minces pour se soutenir d'elles-mêmes. M. Savart, qui a fait une étude particulière de ces phénomènes, fixe les membranes par leurs bords, en les collant sur des cadres en bois ou sur l'ouverture d'une cloche de verre ; il les humecte plus ou moins pour leur donner des tensions plus ou moins grandes ; ensuite, pour les ébranler, il en approche à quelque distance un timbre vibrant, ou un tuyau d'orgue dont le son est plein et soutenu. Dès que le son se fait entendre, la membrane vibre comme si elle était directement ébranlée. Les grains de sable qui la recouvrent sautillent sur sa surface et s'accumulent sur les points de repos pour y dessiner les lignes nodales. Les figures que l'on obtient sont extrêmement variées ; elles dépendent de la tension de la membrane et de l'acuité du son qui la frappe.

M. Savart a essayé d'analyser la série des figures que peut donner une même membrane ébranlée comme nous venons de le dire : et nous ne pouvons mieux faire que de rapporter ici les observations qu'il a faites sur ce sujet intéressant. (*Ann. de phy. et de chim.* t. 32, pag. 386.)

« Pour plus de simplicité, je supposerai toujours qu'on ait d'abord obtenu une figure composée de lignes nodales

rectilignes qui se coupent rectangulairement, et j'examinerai par quel chemin cette figure peut passer à une autre, composée simplement de lignes parallèles.

» Par exemple je suppose, qu'on soit parvenu à produire le mode de division représenté par le n° 1 de la *Fig.* 71; si la tension de la membrane est constante et que le son devienne un peu plus aigu, il pourra arriver que les angles opposés au sommet en $a\,a'$, $b\,b'$, $c\,c'$, $d\,d'$, se désunissent comme dans le n° 2, qui prendra peu à peu l'aspect des n°s 3, 4 et 5, si le son monte toujours; et ensuite celui du n° 6, composé seulement de 4 lignes parallèles; mais ce moyen de passer du premier mode de division à celui du n° 6, par cette première espèce de séparation des angles, n'est pas le seul que puisse employer la membrane; les *Fig.* 72 et 73 présentent des exemples de transformations différentes par lesquelles elle peut encore parvenir au même but de 4 lignes parallèles. Il peut aussi arriver, *Fig.* 74, que les angles opposés en $a\,a'$, $b\,b'$, $c\,c'$, $d\,d'$, soient ceux qui se divisent d'abord, et que la figure tracée par le sable prenne successivement l'aspect des n°s 2, 3, 4, 5 et 6; ou bien que cette division ait lieu comme dans le n° 2, des *Fig.* 75 et 76, ce qui produira encore de nouvelles modifications dans les figures successives qui conduiront à 4 lignes parallèles. Enfin il pourra même se faire que les angles opposés ne se divisent pas comme dans le n° 2 de la *Fig.* 77, qui passe au n° 6, par de simples inflexions des lignes droites en sens contraire.

» Maintenant 4 lignes parallèles peuvent passer à d'autres nombres de lignes parallèles ou dirigées rectangulairement: la *Fig.* 78, présente une transformation de ce mode de division à deux lignes nodales parallèles, et la *Fig.* 79, un passage du même mode de division à 4 lignes également parallèles, mais coupées rectangulairement par deux autres droites.

» En général quand on part d'une figure composée de

lignes qui se coupent rectangulairement, le caractère des modifications successives dépend de la manière dont les angles opposés au sommet se désunissent : c'est ce qu'on peut voir d'une manière fort nette dans les *Fig.* 80 et 81 qui sont des passages de 4 lignes parallèles. Au contraire, si l'on part des lignes parallèles, on peut dire en général que le caractère des modifications dépend des inflexions diverses que ces lignes peuvent affecter : c'est ainsi que, dans les mêmes *Fig.* 80 et 81, les n° 5, considérés comme première modification des lignes droites, doivent produire des phénomènes tout différens, dépendant de ce que dans l'un les lignes se courbent d'abord en dehors, tandis que dans l'autre elles se courbent en dedans. Mais, de toutes les modifications auxquelles les lignes droites peuvent donner naissance, il n'en est point qui offrent des phénomènes plus singuliers que ceux qui résultent des inflexions alternatives que ces lignes peuvent d'abord prendre, selon qu'il se présente deux courbures dans un sens et une dans l'autre, ou trois dans un sens et deux dans l'autre, etc., etc. On en voit des exemples remarquables, *Fig.* 82 et 83.

» Il résulte donc de ces observations, non-seulement que les membranes carrées sont susceptibles de produire tous les nombres possibles de vibration, et que pour chacun de ces nombres elles se divisent d'une manière particulière, mais encore qu'un même nombre de vibration peut être donné par plusieurs modes de division. Quant aux membranes dont les contours sont différens, circulaires, triangulaires, etc., elles présentent des phénomènes analogues quoique plus compliqués. C'est ainsi, par exemple, que, dans une membrane circulaire, trois lignes diamétrales peuvent passer graduellement à trois lignes parallèles et ensuite à une seule diamétrale accompagnée d'une ligne circulaire, *Fig.* 119 à 124; que cinq diamétrales peuvent passer à 5 lignes parallèles, *Fig.* 116 à 118,

et de là à d'autres modes de division, par exemple, à deux lignes circulaires divisées par une seule diamétrale.

» Les transformations successives des lignes nodales sont beaucoup plus difficiles à observer sur les lames rigides que sur les membranes, parce que, comme on ne peut produire des modes de division donné qu'en rendant immobiles plusieurs points de la surface de ces corps, il arrive presque toujours que ces points appartiennent en même temps à un ou plusieurs autres systèmes de lignes nodales, de sorte qu'on tombe souvent d'un son très-grave à un son très-aigu et réciproquement, sans pouvoir passer par les intermédiaires. »

Après avoir constaté par l'expérience cette excessive mobilité des membranes et la facilité avec laquelle elles peuvent passer d'un mode de vibration à un autre, M. Savart a été conduit à supposer que dans les vibrations des plaques, il pourrait bien y avoir divers modes de mouvemens superposés comme dans les membranes et les cordes, et cette supposition est devenue entre ses mains habiles une vérité importante pour la théorie de l'acoustique. Voici l'extrait de son mémoire sur ce sujet. (*Ann. de phy. et de chim.*, t. 36, pag. 191).

« Je suppose maintenant qu'on fasse résonner une lame circulaire dont le centre soit immobile, et qu'elle présente le mode de division composé de deux lignes nodales diamétrales, qui se coupent rectangulairement; dans ce cas, les parties les plus fines de la poussière se réunissent sur le milieu de chacune des quatre parties vibrantes, et elles y forment un petit amas animé de divers mouvemens; si l'on remarque ces quatre points, et qu'on cherche ensuite à produire la figure qui est composée de deux lignes diamétrales et d'une ligne circulaire, on trouve que cette dernière ligne passe justement par les quatre points qu'on avait marqué sur la lame. Si ensuite l'on produit le mode de division composé de trois lignes nodales diamétrales,

ce qui donne six parties vibrantes qui présentent chacune un point formé par la poussière fine, on observe de même qu'en ébranlant ensuite la lame de manière à obtenir la figure où il y a aussi trois lignes diamétrales, mais coupées par une ligne circulaire ; cette dernière ligne passe toujours par les points où s'étaient réunies les parcelles de poussière fine à l'occasion du mode de division précédent. La même épreuve étant faite lorsque la lame présente quatre, six, huit, dix lignes nodales diamétrales, on reconnaît de même qu'elle est le siége d'un mode de division que j'appellerai secondaire, et qui se compose du même nombre de lignes diamétrales que le mode principal, et de plus d'une ligne nodale circulaire. Lorsque la figure principale est formée par un grand nombre de lignes diamétrales, comme les amplitudes des oscillations sont peu considérables, la ligne circulaire de la figure secondaire se trace presque entièrement, de sorte qu'on ne peut pas douter que les petits amas de poussière fine, qui se présentent à l'observation lorsque le nombre des diamètres est très-petit, ne soient les rudimens d'une ligne nodale circulaire ; et si l'on pouvait avoir quelques doutes à ce sujet, il suffirait, pour les lever, de remarquer que ces petits amas s'allongent d'autant plus que le diamètre des lames devient plus petit, l'épaisseur et le mode de division demeurant d'ailleurs les mêmes, de sorte que, passé un certain terme, la ligne circulaire se trace presque entièrement ; ce qui indique que, si dans les lames très-grandes elle se réduit à des points placés sur le milieu de chaque ventre de vibration de la figure principale, c'est que l'amplitude des oscillations étant très-grande, le milieu de chacun de ces ventres est le seul endroit où la lame reste presque plane et horizontale, où par conséquent la poussière peut se réunir, tandis qu'à droite et à gauche de ce point la surface étant inclinée, les parcelles de poussière ne peuvent pas s'y arrêter.

» Ainsi qu'il était naturel de le présumer, les lignes nodales diamétrales de la figure secondaire sont placées dans les mêmes lieux que celles de la figure principale ; c'est ce qu'on peut prouver facilement en plaçant une lame circulaire dans une pince armée de deux mâchoires de bois minces et assez longues pour qu'elles puissent serrer dans toute sa longueur l'une des diamétrales de la lame, disposition qui n'empêche pas les vibrations de se produire comme à l'ordinaire. On reconnaît, par ce procédé, que la figure secondaire se prononce aussi nettement que si la lame n'était fixée qu'à son centre, d'où il faut conclure que ce n'est pas le milieu d'un ventre de vibration du mode secondaire de division qui correspond à chaque ligne nodale de la figure principale, mais que les diamétrales nodales des deux mouvemens se superposent exactement. D'après cela il ne paraît pas douteux que, dans le cas des lignes circulaires seules, il y a des lignes secondaires qui occupent le même lieu que les lignes nodales principales ; ce qu'on peut d'ailleurs prouver directement, en observant que ces derniers lignes peuvent aussi être touchées avec les doigts, et même pincées, en quelque point de leur étendue, entre les mâchoires d'un étau, sans que le mouvement secondaire cesse de se produire.

» Cette coexistence de deux modes de division s'observe non-seulement quand la figure principale ne présente que des lignes nodales diamétrales, mais encore quand les lignes de cette espèce seront coupées par un plus ou moins grand nombre de lignes circulaires. Dans tous ces différens cas, la figure secondaire se compose toujours du même nombre de diamétrales que la figure principale, et le nombre des lignes circulaires étant représenté par n, celui des lignes circulaires secondaires l'est par $2n + 1$, en admettant qu'outre les lignes secondaires apparentes, il y en a encore autant que de principales, et qui sont cachées par elles, ainsi que cela a lieu pour les lignes nodales diamé-

trales. En admettant aussi cette superposition pour le cas des lignes circulaires seules, et en considérant le point formé par la poussière, au centre des disques comme un cercle d'un diamètre infiniment petit, on peut dire encore que dans ce cas le nombre des lignes principales étant n, celui des lignes secondaires est $2n + 1$.

» D'après ce qui précède, il est donc évident que dans les lames circulaires il y a toujours un mode secondaire de division qui se prononce beaucoup mieux que tous les autres. Mais quelles sont les conditions qui rendent ainsi le mode secondaire tellement dépendant du mode principal, que celui-ci étant donné, on peut toujours prévoir celui-là? La solution de cette question paraît assez simple; en effet, parmi tous les modes de division qui existent avec le mode principal (et sans doute qu'il y en a un très-grand nombre), ceux qui ont le plus d'analogie avec lui, qui approchent le plus d'être composés du même système de lignes de repos, doivent se prononcer plus fortement que les autres; et, de tous ceux qui pourront remplir cette condition, celui qui sera le plus simple, sera aussi celui dont les parties vibrantes feront les plus grandes excursions. Ainsi, par exemple, dans le cas de deux lignes diamétrales qui se coupent rectangulairement, de toutes les figures secondaires composées d'abord de deux lignes rectangulaires, la plus simple, celle qui approche le plus d'être réduite à ces deux lignes, c'est celle qui s'accompagne d'une seule ligne circulaire; c'est aussi cette figure qui existe toujours avec le mode de division dont nous venons de parler. Il résulte de là, ce qui est d'ailleurs conforme à l'observation, que la figure secondaire doit être composée de parties vibrantes plus petites que celles de la figure principale, et que les sons secondaires doivent toujours être plus aigus que les sons principaux.

» Mais maintenant, pourquoi le mode de division secondaire ne peut-il être marqué que par une poussière plus

fine que celle qui trace la figure principale, comme s'il y avait une certaine liaison entre les amplitudes des excursions des parties vibrantes, et le degré de ténuité des parcelles de poussières qui peuvent dessiner les lignes nodales? D'abord, je remarquerai que quelle que soit la poussière qu'on emploie, elle peut toujours se rassembler sur les lignes de repos du mode principal de division, et que c'est seulement la figure secondaire qui ne peut être indiquée que par une poussière très-fine. Or, si l'on fait attention à la différence qu'il y a entre du sable, qui est un assemblage de petits globules indépendans les uns des autres, et une poussière très-ténue, comme du lycopode, par exemple, ou même comme la poussière qui se dépose sur les meubles, dont toutes les parties contractent entre elles, et avec la surface de la lame une certaine adhérence, on concevra facilement que ces substances, d'ailleurs si déliées, étant placées sur le milieu d'une partie vibrante du mode principal de division, peuvent, sans se désunir, être transportées avec la partie de la lame sur laquelle elles reposent, surtout si elles se trouvent placées sur une ligne nodale du mouvement secondaire, c'est-à-dire, entre deux portions de disque qui oscillent en sens contraire.

» Pour pouvoir répéter les expériences dont je viens de parler, il faut employer des disques de laiton de plusieurs décimètres de diamètre et de deux ou trois millimètres d'épaisseur; il est indispensable qu'ils soient bien plans, d'égale épaisseur partout; et, pour qu'ils ne présentent point d'inégalité, de densité, ni de rigidité, il est nécessaire de les faire recuire avant de les battre, et de n'employer pour cela qu'un marteau de bois un peu lourd. Ils seront toujours assez raides et assez sonores lorsqu'ils seront bien plans. »

M. Savart a fait aussi une remarque curieuse sur le déplacement des lignes nodales : il a reconnu que, sous certaines conditions, elles peuvent osciller, ou même éprouver

un mouvement de rotation plus ou moins rapide. Voici un extrait détaillé du mémoire qu'il a publié sur ce sujet. (*Ann. de phys. et de chim.*, t. 36, pag. 257.)

« Le nombre et la disposition des parties vibrantes d'un corps dépendent du lieu de l'ébranlement, de la forme même du corps, de sa nature, de ses dimensions et de la position des points de son étendue qu'on a préalablement rendus immobiles.

» Dans certains cas, on ne peut changer aucune de ces conditions sans que l'arrangement des parties vibrantes soit altéré, et dans d'autres, au contraire, le même arrangement peut avoir lieu quand même une ou plusieurs de ces circonstances viennent à varier. C'est ainsi, par exemple, que, quand on promène un doigt mouillé sur le bord d'une cloche d'harmonica, elle ne laisse pas de se diviser de la même manière et de faire entendre le même son, quoique le lieu de l'ébranlement varie continuellement. Il en est de même d'une lame circulaire dont le centre est immobile ; on peut ébranler un point quelconque de sa circonférence, sans que le mode de division subisse aucun changement : seulement la position des parties vibrantes varie, parce que le lieu de l'ébranlement doit toujours être le milieu d'une de ces parties ; de sorte que, si l'archet, en même temps qu'il est animé d'un mouvement de va et vient, tournait tout autour de la lame d'un mouvement uniforme, en restant parallèle à lui-même, les parties vibrantes se déplaceraient en même temps et elles le suivraient en devenant le siége d'un mouvement de rotation continu. Mais ce qui est bien remarquable, ce mouvement de rotation du système des parties vibrantes peut s'établir, quoique le lieu de l'ébranlement demeure le même, et il semble que pour cela il suffise d'abandonner la lame à elle-même après qu'elle a été mise en vibration.

» Je suppose, par exemple, qu'on ait une lame circulaire fixée par son centre, et qu'elle présente l'un des modes de

division qui ne sont composés que de lignes nodales diamétrales, l'expérience montre que ces lignes demeurent parfaitement immobiles, tant que l'archet touche le disque ; mais s'il vient à le quitter subitement, ce qui n'empêche pas le mouvement de subsister encore pendant plusieurs secondes, les lignes de repos oscillent autour de la position qu'elles occupaient d'abord, et elles n'y reviennent que quand le mouvement de vibration est sur le point de cesser. Lorsque le nombre de ces oscillations est assez grand dans un temps très-court, le sable devient un moyen insuffisant pour constater la position variable des lignes nodales, parce qu'il est alors chassé avec trop de violence pour fournir des indications bien nettes ; mais on peut lui substituer une poussière fine susceptible d'adhérer légèrement à la surface de la lame et par conséquent de dessiner le mode secondaire de division : les petits amas qu'elle forme, au milieu de chaque partie vibrante principale, sur la trace de la ligne circulaire secondaire, peuvent être entraînée le long de cette ligne sans se désunir, à cause de l'adhérence que contractent entre elles les parties qui les composent, et ils indiquent parfaitement la position variable des ventres de vibration et par conséquent celle des lignes nodales principales. L'amplitude de ces oscillations est d'autant plus considérable qu'on promène l'archet avec plus de vitesse, et qu'on le sépare plus vivement de la lame vibrante, de sorte qu'il peut arriver que l'oscillation soit assez grande pour que les lignes nodales, entraînées au-delà du milieu de l'intervalle qui les séparait dans leur première position, soient transportées dans le même sens, jusqu'à ce qu'elles aient parcouru toute l'étendue d'une partie vibrante entière. On conçoit que parvenues dans cette nouvelle position, elles ne peuvent pas s'y arrêter subitement et qu'elles doivent osciller de nouveau, c'est aussi ce qui a lieu. Tandis que ces nouvelles oscillations s'exécutent, si l'on vient à donner un

second coup d'archet, en ébranlant toujours la lame par le même point de sa circonférence, on déterminera les lignes nodales à faire un nouveau pas; et si les coups d'archet se suivent à des intervalles réglés, on verra les petits amas de poussière passer successivement par tous les ventres de vibration, s'y arrêter un instant, pour se porter ensuite sur la partie vibrante voisine; mais si l'on multiplie vivement les coups d'archet, le milieu de chaque ventre de vibration cesse d'être indiqué par la stagnation momentanée de la poussière, et le système des parties vibrantes devient le siége d'un mouvement de rotation qui est indiqué par un courant continu de poussière, ressemblant à un petit nuage affectant la forme d'un anneau. *Fig.* 97. Le sens de ce mouvement est subordonné à des circonstances que je n'ai pas pu saisir; tantôt les ondulations des parties vibrantes se propagent de droite à gauche, tantôt de gauche à droite. Seulement j'ai remarqué que, pour l'entretenir, lorsqu'il était une fois produit, il ne fallait pas remonter l'archet en touchant exactement le même point de la circonférence de la lame contre lequel il frottait en descendant, et qu'il fallait le reporter un peu à droite ou un peu à gauche, en le ramenant ensuite à sa première position lorsqu'on le faisait redescendre.

» Quant à la position même que le courant occupe, elle dépend de celle de la ligne circulaire secondaire sur laquelle la poussière tend à se réunir : ainsi, plus le nombre des diamètres augmentera, plus le courant se rapprochera du bord de la lame.

» Il ne paraît pas que le nombre plus ou moins considérable des parties vibrantes influe sur la facilité avec laquelle le mouvement d'oscillation ou de rotation peut s'établir : on l'observe lorsque la circonférence de la lame se divise en quarante ou cinquante parties vibrantes, de même que quand elle ne se partage qu'en un bien moindre nombre. Il se produit aussi facilement dans les lames d'un

petit diamètre que dans celles qui ont de grandes dimensions. Il peut aussi exister lorsque le mode de division se compose de lignes diamétrales coupées par une ou plusieurs lignes circulaires; mais alors les lignes de cette dernière espèce restent fixes, et il peut arriver que ces parties vibrantes qui sont en dedans d'une ligne circulaire affectent un mouvement de rotation, tandis que celles qui sont en dehors restent immobiles : le contraire peut aussi avoir lieu, et il peut également se faire qu'elles tournent toutes à la fois, mais toujours dans le même sens. Dans ce dernier cas, la poussière forme autant de courans qu'il y a de lignes circulaires apparentes dans le mode secondaire de division; et tous les courans sont animés de vitesses différentes, ceux qui sont les plus voisins du centre de la lame se mouvant beaucoup plus rapidement que les autres.

» La condition essentielle de la production de ce mouvement consistant en ce que les parties vibrantes puissent se déplacer sans qu'il y ait altération dans le nombre des vibrations, on conçoit qu'on ne pourra l'exciter dans les lames circulaires que lorsqu'elles présenteront des lignes nodales diamétrales, soit seules, soit coupées par des lignes circulaires; et il est clair qu'il deviendra tout-à-fait impossible pour les lames carrées, triangulaires, etc., dont les parties vibrantes ne peuvent pas changer de place sans qu'il survienne aussi un changement dans le nombre des vibrations; mais on pourra l'exciter dans les anneaux et les timbres, ainsi que dans les cloches proprement dites, parce que ces divers corps peuvent produire le même mode de division, et par conséquent le même nombre de vibrations, quel que soit le point de leur contour qu'on choisisse pour le lieu de l'ébranlement. Les membranes circulaires en sont également susceptibles, même quand elles sont ébranlées par communication, et que le corps sonore d'où partent les ondes excitées dans l'air, reste dans la même position. Pour parvenir à faire cette dernière

expérience il faut remarquer qu'une membrane qui vibre par communication peut, lorsqu'on l'ébranle de très-près, non-seulement renforcer le son du corps qui la met en jeu, mais encore produire un son distinct de celui du corps qui lui communique le mouvement, quoique les sons des deux corps demeurent toujours à l'unisson : c'est dans ce dernier cas qu'une membrane devient très-facilement le siége du mouvement de rotation des parties vibrantes. La poussière qu'on y répand, animée du mouvement tangentiel, forme alors des espèces de courans qui circulent avec beaucoup de vitesse et quelquefois dans des sens très-divers, mais seulement quand la tension de la membrane est inégale.

» Lorsque le changement de position des parties vibrantes est borné à de simples oscillations, l'oreille est avertie de leur existence par des alternatives dans l'intensité du son. Ces alternatives ont été remarquées depuis long-temps dans les timbres et particulièrement dans les cloches, mais sans qu'on sût à quoi les attribuer. On peut se convaincre qu'elles dépendent des oscillations des parties vibrantes en versant un peu d'eau dans un timbre qu'on ébranle avec un archet : on remarque que les rides formées à la surface de ce liquide, vis-à-vis chaque ventre de vibration, sont le siége d'oscillations qui coïncident avec les alternatives d'intensité du son, et que le plus grand renforcement a lieu lorsque les parties vibrantes atteignent la limite de leur excursion dans un sens, tandis que la moindre intensité a lieu lorsqu'elles atteignent la limite opposée. Relativement à l'organe de l'ouïe, l'effet est le même que si les parties vibrantes restaient immobiles par rapport au corps sonore, et que ce corps produisît lui-même des oscillations autour d'un point fixe. Quand le mouvement de rotation s'établit, les alternatives d'intensité disparaissent complètement et alors le son revêt un caractère particulier, sans qu'on puisse apprécier s'il est plus intense

que quand les parties vibrantes sont fixes : j'ai seulement cru remarquer qu'il était moins pur. Mais ce qui n'est pas douteux, c'est qu'il devient plus aigu et d'autant plus que le système des parties vibrantes tourne plus rapidement : quand le nombre des vibrations est considérable et que le corps a de grandes dimensions, le son peut s'élever presque d'un ton. »

487. *Vibrations des corps qui n'ont pas la même élasticité dans tous les sens.*

Chladni avait reconnu dès ses premières expériences, que, sur les plaques de bois, l'inégale élasticité dans les différentes directions empêche les lignes nodales diamétrales de se déplacer et de tourner autour du centre dans tous les sens, comme sur les plaques de verre ou de métal. Cette remarque frappante n'avait pas été développée, et M. Savart l'a prise comme point de départ pour un nouveau travail sur lequel il vient de publier deux mémoires. (*Ann. de phys. et de chim.*, t. 40, pag. 5 et 113.)

Si l'inégale élasticité est la seule cause qui empêche les lignes nodales diamétrales de se déplacer autour du centre, il est évident que la réciproque sera vraie, c'est-à-dire que si l'on voit un même système de lignes nodales affecter sur une plaque des positions déterminées, on en pourra conclure que cette plaque n'a plus la même élasticité dans tous les sens parallèlement à ses faces. Or, les substances cristallisées, telles que le cristal de roche, la chaux carbonatée, etc., n'offrant pas comme le bois les traces visibles de l'arrangement des couches ou des lames qui les constituent, on conçoit qu'il devient possible de reconnaître si leur élasticité est la même dans tous les sens ; car il suffit pour cela de les tailler en plaques, de les faire vibrer, et d'observer si un même système de lignes nodales affecte de préférence certaines positions autour du centre.

M. Savart a fait d'abord sur ce sujet les expériences suivantes ;

Il a remarqué que si l'on fait vibrer une plaque elliptique homogène, de verre ou de métal, *Fig.* 107, le système de deux lignes diamétrales perpendiculaires se place inévitablement suivant les directions du grand axe A A′ et du petit axe B B′, et que si l'on veut à toute force déplacer ce système en ébranlant l'une des extrémités de ces axes, il se déplace en effet, mais non pas sans s'altérer, car il se change en une espèce d'hyperbole H H′ et Y Y′ dont le premier axe est dirigé suivant le grand axe de l'ellipse ; alors le son est plus grave.

Il faut un plus grand effort pour plier l'ellipse suivant A A′ que suivant B B′, ainsi le premier axe de l'hyperbole est dirigé suivant la plus grande résistance à la flexion.

Une plaque circulaire de laiton présente des phénomènes analogues lorsqu'on a diminué son élasticité dans un sens par plusieurs traits de scie parallèles qui ont enlevé seulement une partie de son épaisseur. Dans cet état, le système des deux lignes diamétrales perpendiculaires ne peut plus tourner autour de son centre ; l'une des lignes qui le composent reste fixée dans la direction parallèle aux traits de scie et l'autre perpendiculairement. Mais si l'on ébranle ces points, il se déforme et devient une hyperbole dont le premier axe est encore dirigé suivant la plus grande résistance à la flexion.

Pour étudier ensuite les phénomènes que présentent les plaques dont l'élasticité varie graduellement dans des sens perpendiculaires, ou dans des sens différens, M. Savart a taillé un grand nombre de plaques circulaires de bois ayant leurs faces parallèles plus ou moins inclinées soit au plan des fibres, soit aux fibres elles-mêmes. Supposons par exemple que C C′, *Fig.* 108, représente un cube de bois de hêtre, dont la surface P soit parallèle au plan des fibres, la face T perpendiculaire à leur tranche, et la face B perpendiculaire à leur bout. Si l'on a plusieurs cubes pareils, tirés de la même pièce de hêtre, tous sans défaut, et par-

faitement homogènes entre eux, on en pourra tirer des plaques de même épaisseur et de même rayon, qu'il sera permis ensuite de comparer comme si elles sortaient du même cube. Les unes seront coupées perpendiculairement à la face P, dans les directions PM, PM′, PD et dans les directions intermédiaires ; les autres perpendiculairement à la face T, aussi dans les directions TM, TM″, TD, etc. ; les autres enfin perpendiculairement à la face B, et aussi suivant les directions BM′, BM″, BD, etc. En faisant vibrer toutes ces lames, mais seulement pour obtenir le système des lignes nodales diamétrales perpendiculaires, ou le système des deux branches hyperboliques, M. Savart a trouvé des rapports remarquables entre les positions de ces systèmes et les directions des différens axes d'élasticité du bois de hêtre. Il a reconnu que les nombres de vibrations ne sont liés qu'indirectement avec les modes de division, car deux figures nodales semblables peuvent résulter de sons différens, et réciproquement un même son peut résulter de deux figures nodales différentes. Enfin dans ces plaques hétérogènes, tous les modes de division sont doubles, c'est-à-dire que chaque mode de division, considéré en particulier, peut toujours, en subissant toutefois des altérations plus ou moins considérables, s'établir en deux positions déterminées.

En faisant vibrer trois petites verges prismatiques à bases carrées, qui avaient été taillées dans des cubes pareils aux précédens et suivant les directions DC′, DF et DR, M. Savart a déduit des sons donnés par ces verges le rapport des résistances que le bois de hêtre oppose à la flexion dans ces trois sens rectangulaires. Il trouve qu'en représentant par l'unité la résistance à la flexion suivant DC′, cette résistance est 2,25 suivant DR, et 16 suivant DF.

M. Savart a soumis le cristal de roche à des recherches analogues. On sait que cette substance se présente assez ordinairement dans la nature sous la forme d'un prisme

hexaèdre terminé par deux pyramides *fig.* 109. La ligne s s' qui joint les deux sommets de la pyramide est l'axe du cristal. Or, dans les plaques perpendiculaires à cet axe, le système des deux lignes nodales diamétrales perpendiculaires pouvant, en général, tourner autour du centre, sans altération sensible, il en résulte que l'élasticité est à peu près la même suivant tous les rayons.

Les plaques taillées parallèlement à l'axe n'ont pas toutes la même élasticité : celles qui passent par l'axe et par un des rayons de la coupe A B C D E F du prisme *fig.* 110, donnent les lignes nodales perpendiculaires, ou le système hyperbolique, tandis que celles qui passent par l'axe et par l'apothème o p de la section précédente ne peuvent offrir que deux systèmes hyperboliques à peu près semblables, mais correspondant néanmoins à des sons différens. Les axes de ces hyperboles semblent faire entre eux un angle de 51 ou 52°.

D'autres plaques taillées dans des directions différentes donnent encore des résultats différens, et M. Savart est porté à conclure de l'ensemble de ses expériences que le cristal de roche paraît avoir trois systèmes d'élasticité, chacun représenté par trois lignes. Il essaie même par des considérations ingénieuses de déduire leurs directions; mais nous ne pouvons entrer ici ni dans tous ces détails, ni dans la discussion qui devrait les accompagner.

488. *Vibrations des corps dont aucune dimension n'est petite par rapport aux autres.* Il résulte évidemment de tout ce qui précède que des masses solides quelconques peuvent entrer en vibration comme les verges, ou les lames, ou les membranes, et que pendant leurs mouvemens elles se partagent en diverses parties vibrantes, séparées les unes des autres par des *surfaces nodales* plus ou moins irrégulières. Ainsi, lorsqu'un bloc de bois, de pierre ou de fer, retentit sous le choc du marteau, on peut suivre par la pensée les pressions qui se communiquent de pro-

che en proche dans toutes les directions depuis la première molécule qui reçoit le coup, jusqu'aux molécules qui en sont les plus éloignées, et cette diffusion du mouvement se fait comme dans une colonne d'air, c'est-à-dire, par ondes condensées ou raréfiées ; seulement les ondes sont d'autant plus courtes que l'élasticité de la matière est plus grande. Mais pour ébranler des masses un peu considérables et en faire sortir des sons purs et soutenus, on éprouve toujours de grandes difficultés, et c'est sans doute pour cette raison que l'on n'a fait jusqu'à présent que très-peu d'expériences sur ce sujet. Les masses de différentes substances et de différentes formes offriraient cependant des modes de division et des traces de lignes nodales qui seraient, sans doute, le moyen le plus efficace d'étudier leur structure intérieure et tous les accidens de leur élasticité.

489. *Des vibrations des corps dans différens milieux.* Les corps peuvent vibrer dans les différens fluides élastiques, et même dans les différens liquides, comme ils vibrent dans l'air ; mais on conçoit que l'inertie et la résistance du milieu ambiant doivent exercer une influence sur la rapidité des vibrations, et par conséquent sur leur nombre et sur le ton du son qui en résulte. Cette influence est d'autant plus grande que la masse fluide que le corps solide doit déplacer dans ses mouvemens est elle-même plus considérable. Ainsi les vibrations perpendiculaires à la surface de jonction d'un solide et d'un liquide seront beaucoup plus modifiées que les vibrations tangentes à cette surface. M. Savart a reconnu, par exemple, qu'un disque de verre, ébranlé par un petit tube fixé à son centre et perpendiculairement à sa surface, donne dans l'eau un son beaucoup plus grave que dans l'air ; les lignes nodales concentriques que l'on observe alors ne restent pas non plus les mêmes : dans l'eau elles s'éloignent du centre. Ce phénomène, qui est très-marqué lorsqu'on passe de l'air dans l'eau, doit se produire encore, mais avec moins d'intensité, lorsqu'on

fait vibrer le même corps successivement dans des fluides élastiques différens par leur nature ou seulement par leur densité.

Les différences sont beaucoup moindres dans les vibrations tangentielles : ainsi une lame ou une verge qui vibre dans sa longueur rend sensiblement le même son, soit qu'elle se trouve plongée dans l'air, dans l'eau, ou même dans le mercure.

On conçoit que ce dernier mode de vibration est le seul qu'il soit permis d'employer pour comparer les différens fluides par rapport à la facilité avec laquelle ils transmettent les sons ; car les sons résultans des vibrations normales étant différens dans les différens milieux, il n'y a plus aucun moyen exact de comparaison.

CHAPITRE IV.

Du mouvement de vibration des masses fluides.

490. *Divers moyens de faire vibrer les liquides.* Quand deux corps solides choqués sous l'eau excitent un bruit qui retentit au loin, le liquide est ébranlé *directement* dans tous les points où il touche les surfaces des corps solides vibrans, et il est alors ébranlé, comme le sont les gaz par les frémissemens d'une cloche. C'est encore par un choc direct que les vibrations normales des disques et les vibrations longitudinales des verges dont nous avons parlé précédemment peuvent ébranler l'eau, le mercure ou les autres liquides. Ainsi l'on pourrait penser que le choc des solides est indispensable pour faire vibrer les liquides. Mais le jeu de la sirène peut exciter dans l'eau et sans doute aussi dans tous les liquides des vibrations sonores qui ont une autre origine. On en fait l'expérience de la manière suivante: v v′ est un vase large et profond, *Fig.* 125, dans lequel on ajuste solidement une sirène en s; le tuyau porte-vent t est fermé par un robinet r et devient ici un tuyau porte-liquide, car il communique à un tube en plomb p, rempli d'eau, qui descend d'un réservoir élevé de 12 ou 15 pieds. L'appareil étant ajusté, on met de l'eau dans le vase v v′ jusqu'au-dessus du plateau mobile de la sirène, on ouvre le robinet r, et à l'instant l'eau jaillit, le plateau tourne et l'on entend un son très-distinct. On pourrait penser que le son se communique par les montans de l'instrument qui s'élèvent encore au-dessus du niveau, mais ces montans sont bientôt cachés eux-mêmes par l'eau qui arrive, et quand

tout l'appareil est enfoncé sous l'eau de plusieurs pouces, le son se fait encore entendre, et il paraît même plus pur et mieux soutenu.

Le liquide poussé d'abord dans les ouvertures de la table et du plateau, puis arrêté, puis poussé et arrêté de nouveau, et ainsi de suite par de rapides alternatives, éprouve précisément ce que les gaz éprouvent dans les mêmes circonstances.

Il y a sans doute encore d'autres moyens d'exciter dans les liquides des vibrations sonores sans la percussion des solides : on sait, par exemple, qu'un courant d'étincelles électriques produit un bruit net et soutenu, au milieu d'une masse liquide, et probablement si l'on ajustait un appareil pour enflammer au milieu de l'eau, par l'électricité, de petites bulles du mélange détonant d'hydrogène et d'oxigène, qui se succéderaient rapidement, l'on produirait ainsi des bruits très-intenses, sans employer d'autres solides que les deux bouts du fil mince qui apporteraient le fluide électrique; encore pourrait-on les remplacer par de petites colonnes de mercure, contenues dans des tubes de matière très-peu élastique.

491. *Divers moyens d'exciter les vibrations sonores dans les gaz.* Nous avons déjà vu comment des vibrations peuvent être excitées dans l'air par l'explosion d'une poudre fulminante, par la percussion d'une masse élastique, comme un timbre, une cloche ou un tamtam, et par les oscillations rapides des cordes, des verges ou des plaques. Nous avons aussi indiqué comment la lame mince d'air qui vient se briser contre le biseau du flageolet ou du tuyau d'orgue détermine une oscillation dans toute la colonne d'air adjacente, le changement de pression qui survient en un point de cette colonne élastique se communique rapidement dans toute son étendue, tous les ressorts moléculaires réagissent les uns sur les autres, et la colonne vibre dans son ensemble par la même raison qu'un cylindre

solide vibre dans toute sa masse quand il est ébranlé dans un point quelconque.

C'est encore le même phénomène qui se produit dans la flûte et dans la toupie d'Allemagne, avec cette seule différence que dans le premier cas l'air est poussé contre le bord de l'ouverture, tandis que dans le second cas c'est l'ouverture elle-même qui est poussée contre l'air, par la rotation de l'instrument.

Dans les appeaux ou les réclames dont se servent les chasseurs pour imiter le cri des oiseaux, *Fig.* 114 et 115, le phénomène paraît un peu plus compliqué. Les vibrations sont encore produites par le courant d'air, mais ici le courant entraîne dans son mouvement une partie du fluide qui est contenu dans la cavité de l'appareil, et le fluide ainsi raréfié, n'étant plus capable de soutenir la pression atmosphérique, l'air extérieur rentre, et rentre en excès; alors, nouvelle raréfaction produite par l'entraînement du courant, et nouvelle rentrée déterminée par la pression extérieure, etc. Ainsi toute la masse d'air de la cavité, alternativement raréfiée et comprimée, accomplit des oscillations qui se communiquent au dehors.

C'est par un jeu semblable que M. Cagniard de la Tour explique les sons aigus et variés que l'on peut produire en sifflant avec la bouche. Les lèvres avancées et un peu pressées forment en quelque sorte la calotte du réclame, *Fig.* 114, et les vibrations sont produites, parce que l'air est alternativement raréfié par le courant et comprimé par la pression extérieure. On peut en effet produire les mêmes sons, à peu près, soit qu'on aspire l'air, soit qu'on le pousse dehors par un courant contraire; et M. Cagniard de la Tour est même parvenu à imiter très-bien tous les tons du sifflet naturel en soufflant simplement dans un tube de verre dont l'une des extrémités est fermée en partie par un petit disque de liége au centre duquel on laisse une ouverture circulaire, *Fig.* 115 *bis*. Le son est à peu près le même

soit que l'on souffle en prenant dans la bouche l'une ou l'autre des extrémités. Seulement il faut de longs tâtonnemens pour proportionner l'épaisseur du disque de liége à la largeur de l'ouverture dont il est percé à son centre.

La lampe à gaz hydrogène, que l'on appelle aussi *lampe philosophique*, détermine encore dans l'air un autre mode d'ébranlement. Cet appareil fut imaginé en Allemagne et ensuite étudié par Brugnatelli et Pictet; mais c'est, je crois, M. de La Rive, de Genève, qui a le premier analysé les phénomènes qu'il présente (*Journ. de physiq.*, t. 55, pag. 165). L'hydrogène étant allumé à l'extrémité du tube effilé de verre T, *Fig.* 128, on approche un autre tube long et large A B dans la position marquée par la figure, et l'on entend un son très-intense. La vapeur d'eau formée par la combustion se condense rapidement, et détermine ainsi à quelque distance de la flamme une raréfaction ou une espèce de vide dans lequel l'air environnant se précipite, et le même phénomène se répétant avec une excessive rapidité, on conçoit qu'il en doive résulter un son dont l'intensité et la gravité dépendent du volume de la flamme et des dimensions du tuyau qui l'enveloppe. M. de La Rive a été conduit à cette explication en faisant bouillir de l'eau ou du mercure dans une boule de verre terminée par un tube de 2 ou 3 lignes de diamètre, et de 5 ou 6 pouces de longueur. Quand l'ébullition est vive la condensation de la vapeur dans le tube est accompagnée d'un son plus ou moins intense et plus ou moins soutenu. Ce phénomène et le précédent sont, en effet, dus à la même cause.

Enfin l'on peut dans une masse d'air déterminée exciter des sons *par communication*, c'est-à-dire, par le moyen d'un autre son qui est produit à quelque distance. Tout le monde sait que certains sons de la voix se renflent, et prennent beaucoup d'intensité lorsqu'on les forme devant un vase ouvert ayant une grandeur convenable. Alors l'air du vase vibre, et vibre à l'unisson avec la voix à laquelle

il donne tant de force et d'éclat. Et comme une même masse d'air prend plusieurs modes de vibration, il suffira pour la faire vibrer par communication de produire à une petite distance l'un des sons qu'elle peut rendre. Mais pour donner à ce phénomène plus de régularité, M. Savart a imaginé d'ajuster ensemble deux tuyaux de 4 ou 5 pouces de diamètre et d'un pied de longueur qui glissent l'un sur l'autre comme des tuyaux de lunette; ils peuvent être tout-à-fait ouverts aux deux bouts, ou bien l'un ouvert et l'autre fermé. Par ce moyen on peut faire varier à volonté la colonne résonnante, et par conséquent la rendre propre à renforcer le son que l'on produit à son extrémité ouverte avec un timbre, une cloche, ou seulement une lame vibrante. Les sons résultans ont une force et une rondeur qui étonnent toujours quand on les entend pour la première fois. Un tuyau large et court a la propriété remarquable de renforcer avec plus ou moins d'intensité des sons voisins assez différens les uns des autres, tandis qu'un tuyau long et étroit ne peut renforcer qu'un son déterminé et ses harmoniques, les sons un peu plus graves ou un peu plus aigus ne lui communiquent aucune vibration sensible. Ce mode d'ébranlement de l'air dans les tuyaux ne présente pas les phénomènes compliqués qui se produisent dans le mode ordinaire à cause de l'influence de l'embouchure, et il peut être employé avec avantage pour plusieurs recherches importantes sur les vibrations des gaz.

492. *Des modifications que peut recevoir le son d'un tuyau par la direction du vent, la grandeur de l'embouchure et sa position.* Il résulte des expériences de M. Savart que la direction du vent n'a aucune influence sur les sons que peuvent rendre les tuyaux prismatiques de différentes formes ou même les cavités sphériques. Dans un tuyau prismatique à base carrée, par exemple, l'embouchure ayant les mêmes dimensions, le son produit sera le même soit que l'on prenne pour biseau l'extrémité de l'une des

parois latérales, ou l'un des bords de la base, et toutes les directions intermédiaires du vent donneront encore le même son.

La grandeur et la position de l'embouchure ont au contraire une grande influence. Nous avons déjà remarqué qu'en augmentant la *largeur de l'embouchure*, c'est-à-dire, la distance des deux lèvres, on donne au tuyau une tendance à produire le son fondamental, et qu'en la diminuant on est presque sûr de le faire octavier; mais la *longueur de l'embouchure* exerce une autre influence. Si l'on prend, par exemple, un tuyau prismatique carré, dont l'embouchure soit dans toute la longueur du côté de la base, on verra que le son devient *plus grave* quand l'embouchure devient *plus courte*, et qu'il peut aussi descendre d'une sixte ou même d'une septième, surtout si le tuyau est à peu près cubique. C'est sans doute pour obtenir un effet analogue que les facteurs d'orgues mettent aux deux coins de la bouche des tuyaux, de petites lames de plomb, qu'ils serrent ou qu'ils écartent pour obtenir l'accord. Ces lames sont *les oreilles*, parce qu'elles sont là, disent-ils, pour écouter si le tuyau est au ton.

La fente de l'embouchure restant la même, pour la largeur et la longueur, il est évident qu'on peut la placer en différens lieux sur les parois du tuyau, soit perpendiculairement, soit obliquement par rapport à son axe, et M. Savart a constaté que dans ces diverses positions elle fait rendre au tuyau des sons différens. C'est ce que l'on peut aussi vérifier avec une flûte en prenant pour embouchure l'un des trous du milieu.

493. *De l'influence des dimensions sur les vibrations des tuyaux.* Nous avons vu que c'est la longueur seule des tuyaux ouverts ou fermés qui détermine le son qu'ils doivent rendre, pourvu que cette longueur soit très-grande par rapport à la largeur. Mais quand cette condition n'est pas remplie, la loi des vibrations est beaucoup plus com-

pliquée. Voici les principaux résultats auxquels M. Savart a été conduit dans les recherches étendues qu'il a faites sur ce sujet.

1° Des tuyaux prismatiques rectangulaires, ayant tous une embouchure de même longueur que l'un des côtés de leur base, *produisent le même son* quand les sections perpendiculaires à la ligne de l'embouchure ont la même surface, et quand en même temps les largeurs de ces sections sont au moins un sixième de leurs hauteurs.

2° Quand cette dernière condition est seule remplie, les nombres de vibrations paraissent être entre eux comme les racines carrées des sections.

3° Les nombres de vibrations des tuyaux semblables et semblablement embouchés sont entre eux comme les dimensions homologues de ces tuyaux.

Cette loi s'étend même aux cavités sphériques dont les embouchures sont placées sur de grands cercles et y occupent le même nombre de degrés.

494. *Les parois qui enveloppent une masse d'air ont une influence sur ses vibrations.* L'on sait depuis long-temps, par des expériences souvent répétées, que le son du cor et de la trompette dépend de la matière de l'instrument et du degré d'écrouissage qu'elle a reçu. Un cor, par exemple, qui serait recuit au feu, sans être altéré dans sa forme, ne rendrait plus que des sons faux et étouffés. Les facteurs d'orgues connaissent aussi cette influence de la matière des tuyaux sur les qualités des sons, et ils assurent que, pour faire un mauvais instrument, il suffirait d'altérer très-peu la nature de l'étain qu'ils emploient dans les jeux de métal, ou la nature du bois dans les jeux de bois. Ces observations sont pleinement confirmées par les nombreuses expériences que M. Savart a faites avec des tuyaux de parchemin plus ou moins tendu ou de papier plus ou moins humide. M. Savart a constaté 1° que dans un tuyau prismatique carré, ayant un pied de hauteur et neuf lignes

de côté, le son peut baisser de plus d'une octave quand on humecte de plus en plus le papier qui forme les parois, ce papier est collé sur les arêtes solides du prisme comme sur une espèce de cadre; 2° que le son peut par ce moyen s'abaisser d'autant plus que les tuyaux sont plus courts : ainsi il s'abaisse facilement de plus de deux octaves dans les tuyaux cubiques; 3° qu'il suffit même de faire en papier ou en parchemin une partie seulement de la paroi d'un tuyau pour en faire sensiblement baisser le ton. Nous nous contentons d'énoncer ici ces résultats, car il est facile de voir comment on peut les reproduire par l'expérience.

495. *De la réflexion du son et des échos.* Lorsque les ondes sonores passent d'un milieu dans un autre, elles éprouvent toujours une réflexion partielle, et lorsqu'elles rencontrent un obstacle fixe elles éprouvent alors une réflexion totale.

Que la réflexion soit partielle ou totale, elle s'accomplit toujours dans une direction telle que l'angle de réflexion soit égal à l'angle d'incidence. Ces lois générales ne peuvent être démontrées que par les principes de la mécanique, et nous devons seulement essayer ici de les faire comprendre. Si ss', *Fig.* 111, représente la surface de séparation de deux milieux comme l'air et l'eau, et qu'une ondulation sonore vienne, par exemple, tomber sur l'eau dans la direction DI, en faisant avec la perpendiculaire IP, un angle DIP, une partie du mouvement qui la constitue se communiquera à la masse d'eau, et l'autre partie se communiquera à l'air dans la direction IR, de manière que l'angle d'incidence DIP soit égal à l'angle de réflexion PIR. Ce phénomène se produirait encore suivant la même loi, si la surface s s' était la surface de jonction de deux gaz différens, ou deux portions d'un même gaz ayant des densités différentes, ou si elle était un plan solide de bois, de pierre ou de métal. Seulement dans ce dernier cas le son réfléchi suivant RID aurait beaucoup plus d'intensité. Ainsi un observateur

qui serait placé quelque part sur cette ligne R I entendrait le son comme s'il était produit en I ou sur le prolongement de RI.

C'est sur ce principe général que repose *l'explication des échos.*

Quand un *écho* renvoie le son au point de départ, il est évident que les ondes sonores vont tomber perpendiculairement sur la surface réfléchissante, qui doit être en conséquence un plan ou une surface sphérique dont le centre est le point de départ lui-même. Dans ces circonstances un écho peut répéter un nombre de syllables plus ou moins grand suivant des conditions faciles à déterminer. On sait, par exemple, qu'en articulant très-vite on peut prononcer assez nettement 8 syllabes en 2″; or, en 2″ le son parcourt deux fois 340 mètres; par conséquent si un écho se trouve à 340 mètres seulement, il renverra successivement dans leur ordre toutes les syllabes, et la première reviendra à l'observateur après 2″, c'est-à-dire, à l'instant où la dernière sera prononcée. A cette distance un écho pourra donc répéter 7 ou 8 syllabes; on en cite qui répètent jusqu'à 14 ou 15 syllabes.

Il n'est nullement nécessaire que la surface réfléchissante soit dure et polie; car on observe souvent à la mer que les nuages forment écho, et l'on observe surtout que les voiles d'un bâtiment éloigné, lorsqu'elles sont bien tendues, forment des échos assez parfaits.

Les ondes sonores doivent aussi être réfléchies dans une atmosphère sans nuages, quand le soleil dans toute sa force répand une vive chaleur à la surface de la terre, car les divers points d'une plaine ou d'une colline ne peuvent être également échauffés; l'évaporation, les ombres et d'autres causes encore s'y opposent. Cette inégalité de température détermine une foule de courans chauds ascendans et de courans froids descendans dont la densité n'est pas la même. Ainsi l'onde sonore se réfléchit en partie à chaque

passage d'un courant dans l'autre, et si le son réfléchi n'est pas assez fort pour former écho, il atténue cependant le son direct d'une manière très-sensible. C'est sans doute par cette raison, comme l'a fait remarquer M. de Humboldt, que le son se propage toujours à de plus grandes distances la nuit que le jour, même au milieu des forêts de l'Amérique, où les animaux, calmes et silencieux pendant le jour, troublent et agitent l'atmosphère de mille bruits confus pendant la nuit.

L'explication des *échos multiples*, c'est-à-dire, qui répètent plusieurs fois la même syllabe, repose encore sur les mêmes principes. Car un son réfléchi, ayant la propriété de se réfléchir de nouveau, il est évident que deux surfaces réfléchissantes pourront se renvoyer le son comme deux miroirs opposés se renvoyent la lumière. Aussi c'est entre des tours, ou entre des murs parallèles et éloignés, que les échos multiples se font entendre. On citait autrefois un écho situé près de Verdun qui répétait 12 ou 13 fois le même mot; il était formé par deux tours éloignées seulement de 26 toises.

Enfin, il y a des *échos* qui font à peu près l'office de *porte-voix*. On les observe sous des voûtes plus ou moins hautes. Supposons que la section d'une voûte par un certain plan donne une ellipse A B A′, *Fig.* 112, dont les foyers soient en F et F′, un son formé en F ira par sa réflexion sur toute la courbe A B A′ se concentrer en F′, car on sait que dans l'ellipse tous les rayons menés des points F et F′, au même point de la courbe, font des angles égaux avec cette courbe ou avec la tangente en ce point ou avec la normale. Ainsi les ondes sonores qui vont suivant F I, F I′, etc., se réfléchissent suivant I F′, I′ F′, etc. Par conséquent deux personnes qui seraient placées l'une en F et l'autre en F′, pourraient s'entendre à la distance de 50 ou même de 100 pieds en parlant à voix très-basse, sans qu'aucun mot pût être saisi par des auditeurs intermédiaires. Il y

a au Conservatoire des arts et métiers une grande salle carrée qui présente ce phénomène à ses angles opposés.

496. *Des surfaces nodales que l'on observe dans les grandes masses d'air qui sont en vibration.* Lorsqu'on produit un son très-intense et soutenu dans une galerie ou seulement dans une chambre ordinaire, on observe que le même son n'a pas la même intensité dans toute l'étendue de l'enceinte. Dans certains points il est fort et assourdissant, dans d'autres il est très-faible ; ces derniers points sont comme des nœuds de vibration où l'air n'éprouve que de très-petits déplacemens. M. Savart a essayé de suivre la trace de ces lignes ou surfaces nodales, et nous indiquerons seulement le procédé dont il s'est servi, car il n'y a sur ce sujet aucun résultat simple et général.

Le son est produit avec un timbre et un tuyau renforçant, et on l'écoute aux différens points de l'enceinte avec une espèce d'oreille artificielle, qui se compose d'un cône évasé, d'un tube conique et d'une membrane.

cc', *Fig.* 113, représente le cône, tt' le tuyau, et $m\,m'$ la membrane ; celle-ci doit être posée sur les bords du tube recourbé et ajustée pour recevoir divers degrés de tension. On place l'axe du cône dans la direction suivant laquelle on veut écouter, et l'on juge de l'intensité du son par les vibrations de la membrane, c'est-à-dire, par les mouvemens du sable dont on la recouvre à l'instant de l'expérience.

La grandeur de l'enceinte, sa forme et tous les accidens que présentent ses parois sont autant de causes qui font varier les formes et les positions des surfaces nodales, pour une même position du timbre. Quant à la cause elle-même qui détermine la formation des nœuds, c'est sans aucun doute la rencontre des ondes directes et des ondes réfléchies, mais jusqu'à présent il n'y a pas sur ce sujet des observations assez nombreuses et assez exactes, pour que l'on puisse essayer d'en présenter une théorie.

CHAPITRE V.

Des vibrations de quelques instrumens de musique.

497. *Communication des vibrations sonores entre les solides et les fluides.* Les liquides et les gaz ne reçoivent, en général, leur mouvement de vibration que par le choc direct des corps solides, ou au moins par l'intermédiaire de ces corps comme dans la sirène et les tuyaux. Mais dès qu'ils ont reçu ce mouvement, ils peuvent à leur tour le transmettre à tous les corps solides qu'ils rencontrent. C'est ainsi, par exemple, que l'on voit une corde d'instrument se mettre en vibration dès qu'elle *entend* le son qu'elle peut rendre ou l'un de ses harmoniques, et que des carreaux de vitres s'ébranlent et vibrent fortement sous l'influence de certains sons de la voix, comme sous l'influence du bruit du canon. Ce phénomène, qui se présente d'une manière frappante sur tous les corps solides très-mobiles, se produit pareillement dans les corps plus inertes et moins élastiques, et il n'y a peut-être pas une cathédrale dont la grosse cloche ne fasse vibrer d'une manière sensible certains piliers ou certains massifs considérables. Il est permis de conclure ici de ce que l'on observe à ce que l'on n'observe pas, et puisqu'une masse solide quelconque peut entrer en vibration sous le choc du marteau et produire un son déterminé, on peut conclure qu'elle entrera en vibration plus ou moins marquée lorsque ce son en traversant l'eau ou l'air viendra la frapper. On peut même conclure qu'en général elle entrera en vibration pour tous les sons possibles, car en général il n'y a pas de son qu'elle ne puisse rendre, soit comme son fondamental, soit comme

harmonique, si elle était convenablement ébranlée, et par conséquent il n'y a pas de son qui, en la frappant, ne détermine en elle un certain mode de vibration. Si l'on conservait quelque doute sur cette conclusion générale, il suffirait de remarquer que le son produit dans un fluide est transmis avec plus ou moins de facilité par une masse solide quelconque, et que certainement il ne peut être transmis par elle sans l'avoir forcée à vibrer à l'unisson avec lui. Mais il serait curieux de savoir comment le mouvement se détermine suivant les diverses obliquités des surfaces par rapport à la direction de l'onde. Il n'y a sur ce sujet qu'un très-petit nombre d'expériences : M. Savart a constaté, par exemple, qu'une membrane tendue sur un cadre ne vibre pas de la même manière quand on lui présente une plaque sonore, perpendiculairement ou parallèlement. Dans le premier cas ses vibrations sont tangentielles, et dans le second elles sont normales comme celles de la plaque.

Il est probable que les liquides sont plus efficaces que les gaz pour déterminer ainsi des vibrations dans les solides, et sans doute en disposant sous l'eau des corps de différentes formes l'on pourrait, au moyen du sable, reconnaître des vibrations que le même moyen ne rendrait pas sensibles dans l'air.

498. *Communication des vibrations dans les corps solides contigus.* Puisque les vibrations se transmettent des fluides aux solides, elles doivent à plus forte raison se transmettre dans toute l'étendue d'un système solide dont les diverses parties sont juxta-posées et tellement contiguës qu'elles ne laissent entre elles aucune solution de continuité. Un pareil système ne forme plus qu'un tout, qui, dès qu'un point est ébranlé, se partage comme un seul corps, en parties vibrantes séparées par des lignes nodales; chacune des pièces perd en quelque sorte son individualité; sa liaison avec les pièces voisines l'empêche de

vibrer comme elle ferait si elle était seule; à peu près comme une portion de plaque prend des modes de vibrations différens, si elle est détachée et ébranlée à part ou si elle reste unie à la plaque entière.

M. Savart a fait un grand nombre d'expériences sur ce sujet, il a varié les appareils de mille manières pour montrer le fait général de la communication du mouvement dans toutes les parties d'un système composé de lames, de plaques, de cloches, de cordes, etc.; mais, ce qui est plus important, il a constaté les différens sens des vibrations, et il a été ainsi conduit à ce résultat général, que, dans un système quelconque, toutes les molécules vibrantes ont des mouvemens parallèles à l'ébranlement primitif. Par conséquent, si le mouvement est produit par un archet, toutes les molécules vibrent parallèlement à la ligne que parcourent les crins dont il se compose, et s'il est produit par un petit tube de verre fixé par une de ses extrémités en un point quelconque du système et ébranlée sur sa longueur par la friction des doigts ou d'un drap mouillé, toutes les molécules vibrent suivant des lignes parallèles à l'axe de ce tube.

499. *Des instrumens à anches.* Une anche est, en général, une lame vibrante, mise en mouvement par un courant d'air. Supposons, par exemple, que dans une plaque de zinc ou de cuivre PP′, *Fig.* 129, de 2 ou 3 millimètres d'épaisseur on fasse une ouverture rectangulaire ABCD, longue de 3 centimètres et large de 7 ou 8 millimètres seulement, et que l'on soude près de l'un de ses petits côtés une lame de cuivre LL′, très-mince et très-élastique, qui puisse vibrer dans cette ouverture en rasant les bords AB, BC et CD. On aura ainsi la plus simple des anches, et pour la mettre en mouvement il suffira d'appuyer la plaque PP′, longitudinalement contre les lèvres et de souffler en dirigeant le vent vers l'extrémité libre de la lame LL′. L'air la met en vibration, et l'ouverture ABCD, étant ainsi

alternativement ouverte et fermée, l'air passe et s'arrête par intermittences, de là des ondulations sonores dont la longueur dépend du nombre des vibrations que la lame vibrante L L′ peut exécuter à raison de ses dimensions et de son élasticité. Le son est le même que si la lame vibrait par écartement mécanique, mais il est incomparablement plus intense. En disposant sur la même plaque plusieurs lames qui donnent les sons de la gamme, on peut faire une espèce d'instrument propre à jouer des airs.

L'anche dont on se sert dans les jeux d'orgues repose sur le même principe, mais elle est autrement ajustée. On y distingue deux tuyaux mis bout à bout, T et T′, *Fig.* 126, un bouchon B qui les sépare, et l'anche A, proprement dite, qui traverse ce bouchon; on voit ces trois pièces séparées dans la *Fig.* 127. L'anche elle-même est représentée en détail dans la *Fig.* 130; elle se compose de trois pièces essentielles, *la rigole* R, *la languette* L *et la rasette* Z.

La rigole est un tube de métal prismatique, ou demi-cylindrique, fermé au bout inférieur, ouvert au bout supérieur, et percé latéralement d'une fenêtre qui établit la communication entre les deux tubes de part et d'autre du bouchon.

La languette est la lame vibrante; dans sa position naturelle elle ferme la fenêtre ou à peu près, c'est-à-dire qu'elle en rase les parois par ses trois bords libres pendant qu'elle accomplit ses battemens. Son quatrième bord est solidement fixé sur la paroi du tube, soit avec des vis, soit au moyen d'une soudure.

La rasette est un fil de métal très-ferme, doublement recourbé à sa partie inférieure par laquelle il appuie fortement sur toute la largeur de la languette, comme on le voit dans la *Fig.* 130. Elle glisse à frottement dans le bouchon, elle sert, comme on voit, à changer la longueur vibrante de la languette, car, au-dessus de la rasette, rien ne peut vibrer.

Le vent du soufflet entre par le pied du tuyau T, presse la languette pour s'ouvrir un passage, traverse la rigole et sort par le tuyau T'. La languette ainsi écartée pour un instant est bientôt rappelée par son élasticité; et accomplit sous ces deux forces contraires des vibrations qui se répètent aussi long-temps que dure le courant d'air. La *Fig.* 126 représente un tuyau à anche qui est vitré vis-à-vis la languette pour que l'on puisse en observer le jeu. Le nombre des vibrations dépend surtout des dimensions de la languette et de sa rigidité, il est en général peu différent de ce qu'il serait si cette lame vibrait à vide par un écartement mécanique. Mais l'ajustement des tuyaux donne au son un timbre et une intensité remarquables; ces deux qualités sont ici très-intimement liées, cependant l'intensité dépend surtout de la vitesse du courant et le timbre de la forme des tuyaux. L'on conçoit en effet qu'un courant plus rapide détermine dans la languette des oscillations dont l'amplitude est plus grande, leur durée restant la même; ainsi l'intensité du son croît avec la vitesse du courant, à moins que cette vitesse ne soit assez grande pour fléchir la languette et y déterminer un nœud de vibration. L'on conçoit ensuite que la languette, les tuyaux et les masses d'air qu'ils contiennent forment un système vibrant dont toutes les parties donnent au son un timbre particulier. Une condition fondamentale pour que l'anche *parle bien* et rende un son plein et agréable, c'est que les masses d'air des tuyaux soient telles par leur forme et leur étendue qu'elles se mettent facilement à l'unisson avec la languette. Mais cette condition peut être remplie pour chacun d'eux d'une infinité de manières, et l'on a fait de nombreux essais pour produire par ce moyen des sons articulés imitant la voix humaine; on a donné au tuyau inférieur des formes anguleuses, rentrantes, ou diversement contournées; on a fait le tuyau supérieur, conique, évasé, renflé en son milieu; on y a tendu des membranes,

et disposé des feuilles ou des lames de différentes substances; il n'y a pas une de ces modifications qui ne donne au son un timbre particulier, et l'on peut ajouter que plusieurs combinaisons de cette sorte, imaginées par M. Grenié, n'ont pas été sans succès pour faire sortir des tuyaux d'anches certains sons plus ou moins analogues aux sons des voyelles articulés par la voix humaine.

M. Grenié paraît être le premier qui ait donné aux anches leur perfection actuelle; autrefois la languette venait battre sur les bords de la fenêtre; elle était trop large pour passer alternativement en dedans et en dehors, et le son qu'elle donnait avait toujours quelque chose de la voix criarde du canard.

Les embouchures de basson, de hautbois et de clarinette ne sont autre chose que des anches diversement ajustées. Dans ces instrumens c'est la pression des lèvres qui tient lieu de rasette.

500. *Des instrumens à cordes.* Tous les instrumens à cordes ont une caisse sonore, et tout le monde sait que la qualité du son dépend de la construction de la caisse. La corde, la caisse et l'air qu'elle contient, forment encore un système vibrant dont chaque partie imprime au son un timbre particulier. C'est la corde qui donne le ton, c'est-à-dire, que, dans le reste de l'instrument, toutes les pièces doivent se mettre à l'unisson avec elle, et pour cela se partager convenablement par des lignes nodales.

Il est clair, en effet, que la liaison de la corde avec tout le système ne peut pas modifier le son qu'elle doit rendre d'après sa longueur et sa tension, car les points par lesquels elle touche les chevalets sont inévitablement des nœuds, et ces nœuds une fois déterminés le son en est une conséquence nécessaire. Il faut donc que la caisse soit d'une telle substance et d'une telle forme qu'elle puisse instantanément prendre l'unisson de toutes les cordes dans tous leurs tons, et il faut en outre qu'elle puisse instantanément

aussi imprimer ses vibrations à la masse d'air qu'elle contient, et par conséquent que cette masse d'air soit apte à les recevoir. Ces conditions multipliées font assez voir combien il est difficile de faire un bon instrument à cordes, et par exemple, un bon violon. Car en supposant que la matière de la caisse vibre parfaitement bien, il pourra se faire que par sa forme la masse d'air qu'elle enveloppe reçoive mal ses vibrations, et l'instrument sera mauvais. Un peu plus d'élasticité ou de rigidité dans le bois de la table supérieure, exigera sans doute une autre forme dans la caisse, et c'est pour cela que deux violons également parfaits ont cependant des formes sensiblement différentes, et que deux violons de même forme peuvent être, l'un très-bon et l'autre fort médiocre.

Il suffit quelquefois d'un changement léger dans les pièces mobiles pour rendre un violon un peu meilleur ou un peu plus mauvais. Car les vibrations passent de la corde à la table supérieure par *le chevalet*, et de la table supérieure à la table inférieure au moyen de *l'âme*. La position absolue de ces pièces et leur position relative ne peut donc manquer d'avoir quelque influence sur la facilité avec laquelle le son passe de la corde à la caisse et de la caisse à la masse d'air. M. Savart a fait des expériences variées et intéressantes pour montrer aux yeux par le mouvement du sable la transmission des vibrations dans les diverses pièces du violon, et il est parvenu ainsi à indiquer les fonctions principales que chacune d'elles doit remplir. Cependant la pièce la plus simple doit satisfaire à tant de conditions différentes, qu'il est à peu près impossible d'en faire une analyse exacte, et sans doute si l'on voulait la changer pour mieux l'approprier à tel ou tel but, il est très-probable qu'elle deviendrait moins apte pour tel ou tel autre et que l'on perdrait d'un côté au moins autant que l'on gagnerait de l'autre.

CHAPITRE VI.

De la vitesse du son dans les différens milieux.

501. *Vitesse du son dans les fluides élastiques.* Newton avait donné une expression de la vitesse du son dans l'air (*voy.* les dernières propositions du second livre des *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*). Cette expression conduisait à un résultat trop petit : elle donnait une vitesse qui n'était que les $\frac{5}{6}$ environ de la vitesse donnée par l'expérience. Newton avait lui-même essayé d'expliquer cette différence, mais il était réservé à M. de la Place d'en trouver la véritable cause. Le mouvement qui constitue le son ne peut pas se propager dans un milieu quelconque sans comprimer les molécules auxquelles il se communique, et comme, en général, toute compression est accompagnée d'un dégagement de chaleur, M. de la Place suppose que c'est cette chaleur dégagée qui modifie la loi de l'élasticité et qui accélère la propagation du son. Si l'onde condensée produit de la chaleur, l'onde raréfiée produit essentiellement du froid, et l'on pourrait croire que ces deux effets contraires se compensent exactement ; ils se compensent en effet pour ce qui regarde la température, car le son qui passe dans l'air n'affecte nullement le thermomètre le plus sensible ; mais cette compensation définitive dans la température n'empêche pas qu'il n'y ait successivement, entre deux molécules voisines, dégagement de chaleur et de froid, et n'empêche pas, par conséquent, que la loi de leur élasticité ne diffère de la loi de Mariotte.

Après avoir assigné cette cause, M. de la Place l'a trans-

formée en calcul, et il a été conduit à la formule suivante, pour la vitesse de la propagation du son dans les gaz et les vapeurs.

$$v = \sqrt{\frac{g\,H}{D} \cdot K}$$

v, vitesse de propagation en 1″, évaluée en mètres.

g, gravité exprimée en mètres ou $9^m,8088$.

H, hauteur de la colonne de mercure, évaluée en mètres et réduite à zéro, qui exprime la pression du gaz.

D, densité du gaz, celle du mercure à 0 étant prise par unité.

K, rapport des deux chaleurs spécifiques du gaz; c'est, comme nous l'avons vu (264), le quotient de sa capacité à pression constante, par sa capacité à volume constant.

Pour appliquer cette formule à l'air soumis à une pression et à une température quelconque t, il suffit de remarquer qu'à la température 0 et sous la pression de $0^m,76$, la densité de l'air par rapport au mercure est 10466,82 et qu'ainsi à la température t et sous la pression H on a :

$$D = \frac{H}{0,76.\ 10466,82\ (1 + at)}$$

et par conséquent

$$v = \sqrt{9,8088.\ 0,76.\ 10466,82\ (1+at).\ K.}$$

Et comme nous avons vu précédemment (264) que pour l'air $K = 1,3748$, il en résulte

$$v = 327.52 \sqrt{1+at}$$

pour la vitesse du son dans l'air à la température t.

a est le coefficient de la dilatation des gaz ou 0,00375.

On voit que cette vitesse est tout-à-fait indépendante de la pression et dépendante seulement de la température.

C'est d'après cette formule que nous avons calculé la vitesse du son dans l'air supposé sec depuis — 50 jusqu'à + 50°. Les corrections qu'il faudrait faire pour la vapeur ne seraient sensibles que pour les températures élevées.

Tableau des vitesses du son dans l'air, depuis — 50° *à* + 50°.

Température.	Vitesses en mètres.	Température.	Vitesses en mètres.	Température.	Vitesses en mètres.	Température.	Vitesses en mètres.
—50	295,23	—24	312,44	0	327,52	+26	343,12
—49	295,91	—23	313,08	+ 1	328,14	+27	343,70
—48	296,58	—22	313,72	+ 2	328,74	+28	344,29
—47	297,26	—21	314,36	+ 3	329,35	+29	344,87
—46	297,94	—20	315,00	+ 4	329,97	+30	345,45
—45	298,61	—19	315,64	+ 5	330,58	+31	346,03
—44	299,29	—18	316,28	+ 6	331,19	+32	346,62
—43	299,95	—17	316,92	+ 7	331,80	+33	347,19
—42	300,63	—16	317,54	+ 8	332,40	+34	347,78
—41	301,30	—15	318,17	+ 9	333,01	+35	348,35
—40	301,96	—14	318,81	+10	333,61	+36	348,93
—39	302,63	—13	319,44	+11	334,21	+37	349,50
—38	303,29	—12	320,07	+12	334,81	+38	350,08
—37	303,95	—11	320,70	+13	335,41	+39	350,65
—36	304,64	—10	321,32	+14	336,01	+40	351,23
—35	305,27	— 9	321,94	+15	336,61	+41	351,80
—34	305,94	— 8	322,57	+16	337,21	+42	352,30
—33	306,59	— 7	323,20	+17	337,80	+43	352,92
—32	307,24	— 6	323,81	+18	338,40	+44	353,51
—31	307,90	— 5	324.44	+19	338,99	+45	354,08
—30	308,55	— 4	325,09	+20	339,58	+46	354,64
—29	309,20	— 3	325,68	+21	340,18	+47	355,21
—28	309,85	— 2	326,29	+22	340,77	+48	355,78
—27	310,50	— 1	326,91	+23	341,35	+49	356,35
—26	311,15	— 0	327,52	+24	341,94	+50	356,91
—25	311,79			+25	342,52	+	

On voit que pour la température de 16° la vitesse est d'après la théorie de $337^m,21$, tandis que l'expérience a donné $340^m,88$. La différence $3^m,67$ n'est qu'environ *un* centième de quantité cherchée et elle est sans doute assez faible pour que l'on puisse l'attribuer aux erreurs d'observation, et peut-être en partie à l'influence de la vapeur d'eau répandue dans l'air au moment des expériences. Ainsi ce résultat est une confirmation frappante de la théorie de M. de la Place.

La formule précédente donnera sans doute avec la même exactitude la vitesse du son dans tous les fluides élastiques lorsqu'on connaîtra pour chacun d'eux le rapport κ des deux chaleurs spécifiques. Ou réciproquement la vitesse de la propagation du son dans un gaz quelconque étant déterminée, on en pourra déduire la valeur de κ; et il se présente un procédé assez simple pour chercher la vitesse du son dans un gaz: il consiste à faire vibrer un tuyau, de longueur connue, rempli de ce gaz, et à noter le son résultant. Ces expériences n'auraient pas moins d'intérêt pour la théorie de la chaleur que pour celle de l'acoustique; et l'on voit à quel degré de perfection ces théories ont été portées par M. de la Place, puisqu'il suffit maintenant qu'un expérimentateur écoute le son produit par un tuyau vibrant de grandeur connue pour en pouvoir déduire la vitesse de la propagation du son dans le gaz qui remplit le tuyau et même le rapport des deux chaleurs spécifiques de ce gaz.

En supposant que pour l'oxigène et l'azote la valeur de κ soit sensiblement la même que pour l'air, c'est-à-dire 1,3748, on trouverait $341^m,33$ pour la vitesse du son dans l'azote à 16°, et $321^m,13$ pour sa vitesse dans l'oxigène; ainsi le son mettrait $11'',718$ à parcourir 4 mille mètres dans l'azote et $12'',456$ dans l'oxigène. La différence $0'',738$ serait très-appréciable; pour une distance de 8000 mètres elle deviendrait $1'',5$. Il m'a semblé que l'on pourrait ti-

rer de là un moyen direct de reconnaître si dans l'air atmosphérique les molécules d'oxigène exercent leurs pressions sur les molécules d'azote et *vice versâ*. En effet, si dans le mélange qui constitue l'atmosphère, les molécules de l'un des gaz ne pouvaient pas presser les molécules de l'autre, il y aurait toujours deux sons qui se propageraient séparément, l'un plus rapide se transmettrait par l'azote, et l'autre plus lent par l'oxigène, et à 8000 mètres de distance le premier serait entendu 1″,5 avant le second. Ces deux sons il est vrai n'auraient pas la même intensité, puisque, dans l'air, l'azote est plus dense que l'oxigène. En 1823, j'ai fait avec M. Arnoult, capitaine d'artillerie, plusieurs expériences dans le but de résoudre cette question. M. de ClermontTonnerre, alors ministre de la guerre, nous avait donné avec sa bienveillance accoutumée toutes les autorisations convenables. Nos expériences eurent lieu à quelque distance de Paris, dans la plaine de Villejuif d'abord et ensuite dans la plaine de Maisons; nous nous placions successivement à 4, 5, 6, 7 ou 8 mille mètres du canon; il nous fut assez facile de trouver des stations d'où l'on pût apercevoir la lumière de l'explosion et entendre un son bien net et tout-à-fait instantané, sans écho ni roulement; mais dans aucune des expériences il ne nous fut possible de distinguer deux sons, l'un plus fort, l'autre plus faible, et espacés comme ils auraient dû l'être s'ils se fussent propagé le premier par l'azote et le second par l'oxigène.

Nous devons donc en conclure, ou que les molécules des différens gaz se pressent l'une l'autre, ou que le bruit du canon qui se propagerait par l'oxigène de l'air est d'une trop faible intensité pour être entendu à la distance où il pourrait être séparé par un intervalle sensible du bruit plus intense qui se propage dans l'azote. En admettant la première conclusion il faudrait renoncer aux raisonnemens que l'on a coutume de faire pour expliquer plusieurs

phénomènes que présentent les mélanges gazeux et surtout la promptitude avec laquelle les odeurs et les vapeurs se disséminent dans des masses d'air d'une grande étendue.

502. *Vitesse du son dans les liquides.* M. de la Place a aussi donné la formule suivante pour calculer la vitesse du son dans les liquides (*Ann. de Phys. et de Chim.*, t. 3, pag. 164 et 238.)

$$v = \sqrt{\frac{g}{\lambda}}$$

v, vitesse du son dans le liquide, exprimée en mètres.

g, gravité, exprimée en mètre ou $9^m,8088$.

λ, raccourcissement qu'éprouve une colonne horizontale du liquide de 1 mètre de longueur lorsqu'elle est comprimée dans un tube sans élasticité par un poids égal au sien.

Pour appliquer cette formule il suffit donc de connaître λ. Or, cette détermination est facile quand on connaît les compressions des liquides sous le poids d'une atmosphère, comme nous les avons rapportées dans la page 65. En effet, l'eau, par exemple, se comprimant de 47,85 millionièmes de son volume sous une pression d'une atmosphère, il est évident qu'une colonne d'eau de 1 mètre se comprimera de 47,85 millionièmes de mètres dans un tube sans élasticité. L'atmosphère qui a donné cette compression était une colonne de mercure de $0^m,76$ de hauteur à la température de 10°, ayant par conséquent une densité de 13,544. Elle était équivalente à une colonne d'eau de $10^m,2934$; ainsi une colonne d'eau de 1 mètre donnerait un raccourcissement de $\frac{0,00004785}{10,2934}$ ou $0^m,000004648 6$; c'est la valeur de λ; en la substituant dans la formule on trouve enfin qu'à la température de 10°, la vitesse du son dans l'eau est de 1453 mètres par seconde.

La formule précédente peut facilement être transformée de la manière suivante :

$$v = \sqrt{\frac{9{,}8088.\ 0{,}76.\ 13{,}544 \times 1000000}{DC}}$$

D est la densité du liquide par rapport à l'eau.

C, la compressibilité du liquide pour une atmosphère, en prenant pour unité les millionièmes tels qu'ils sont rapportés dans la troisième colonne du tableau de la p. 65.

Sous cette forme, il n'y a plus qu'à substituer pour D et C leurs valeurs et achever le calcul. Le résultat sera la vitesse du son dans le liquide à la température de 10°, parce que toutes les compressions de la page 65 sont déterminées pour cette température. On trouve ainsi les résultats suivans.

Vitesse du son dans divers liquides à la température de 10°.

Noms des liquides.	Densité.	Compressibilité sous 1 atm. évaluée en millionièmes du volume primitif.	Vitesse du son en 1" exprimée en mètres.
Éther sulfurique.	0,712. . . .	131,35. . . .	1039
Alcool..	0,795. . . .	94,95. . . .	1157
Éther hydrochlorique.. . .	0,874. . . .	84,25. . . .	1171
Essence de térébenthine. .	0,870. . . .	71,35. . . .	1276
Eau..	1, ...	47,85. . . .	1453
Mercure.	13,544. . . .	3,38. . . .	1484
Acide nitrique.	1,403. . . .	30,55. . . .	1535
Eau saturée d'ammoniaque.	0,9	33,05. . . .	1842

L'eau est le seul de ces liquides qui ait été soumis à des expériences directes. M. Colladon a trouvé que la vitesse du son dans l'eau du lac de Genève, est de 1435 mètres par seconde; ce nombre est assez peu différent de 1453 que donne la théorie. Cependant, quelque petite que soit la quantité de chaleur dégagée par les liquides pendant leur compression, l'on aurait pu s'attendre à

voir le résultat de l'expérience surpasser un peu celui de la théorie.

Les nombres de la troisième colonne sont tous empreints de l'incertitude qui peut rester sur les densités des liquides et de l'incertitude plus grande encore qui peut rester sur leur compressibilité ; en prenant, par exemple, pour l'alcool la compressibilité de M. OErsted, on trouverait 2423 mètres pour la vitesse du son dans ce liquide, au lieu de 1157 que donne la compressibilité de MM. Colladon et Sturm.

503. *Vitesse du son dans les solides.*

La formule que M. de la Place a donnée pour les liquides s'applique aussi aux corps solides. Il paraît seulement qu'il reste alors quelque incertitude théorique sur la manière dont on doit estimer la valeur de λ ; on admet bien qu'une tige de métal placée horizontalement se raccourcit ou s'allonge de la même quantité, lorsqu'elle est pressée ou tirée dans sa longueur par des forces égales ; et comme il est plus facile, dans les solides, de mesurer l'allongement que le raccourcissement, on admet que dans la formule

$$v = \sqrt{\frac{g}{\lambda}}$$

λ représente l'allongement qu'éprouve une tige de 1 mètre de longueur, tirée par un poids égal au sien. Mais nous avons vu (462 et 463) que cet allongement n'est pas le même, si l'on suppose que la tige est tirée par ses deux bouts et libre par son contour, ou si l'on suppose qu'elle est tirée par tous les points de la surface. Plusieurs considérations font présumer que λ doit, dans les solides comme dans les liquides, représenter le changement de volume que la tige éprouve lorsqu'elle est sollicitée par des forces égales sur tous les points de sa surface. Dans cette hypothèse, on devrait prendre pour λ les 3/2 de l'allongement que la tige éprouve lorsqu'elle est simplement

tirée par ses deux extrémités. Ainsi, d'après les expériences de MM. Colladon et Sturm, une tige de verre s'allongeant de 11 dix millionièmes pour une traction équivalente à 1 atmosphère, il faudrait prendre $\frac{33}{2} = 16,15$ dix millionièmes pour le changement de volume du verre soumis à cette traction en tous ses points. Ensuite, en réduisant ce changement de volume à ce qu'il ferait pour une traction équivalente au poids d'une tige de verre de 1 mètre, on trouverait 4959 mètres pour la vitesse du son dans le verre. Borda ayant trouvé qu'une lame de laiton de $3^m,7356$ pesant 1,1320 kilog. s'allonge de $0^m0001121$ pour une traction de 11,7484 kilog., il est facile de conclure par la même hypothèse que la vitesse du son dans cette substance est de 2905 mètres.

M. Chladni a imaginé depuis long-temps une autre méthode tout-à-fait directe et expérimentale pour déterminer la vitesse du son dans les solides.

Soit v, la vitesse du son dans l'air, l la longueur d'un tuyau ouvert, et n le nombre des vibrations qu'il fait en 1″, lorsqu'il donne le son fondamental. La longueur des ondes qu'il excite est alors égale à la longueur l du tuyau (480); ainsi, les n ondulations qu'il excite en 1″ forment une longueur nl qui est précisément égale à la vitesse v, c'est-à-dire, à l'espace que le son parcourt en 1″. On a donc

$$v = nl.$$

Soit v′ la vitesse du son dans une substance solide quelconque, l la longueur d'une verge cylindrique de cette substance, et n′ le nombre des vibrations qu'elle fait en 1″, lorsqu'elle donne le son fondamental, c'est-à-dire, lorsqu'elle vibre longitudinalement, ayant ses extrémités libres et un nœud au milieu. La longueur des ondes qu'elle excite alors dans sa propre substance est égale à l (485); ainsi, les n′ ondulations qu'elle excite en 1″, forment une

longueur $N' L$ qui est précisément égale à la vitesse v' du son, c'est-à-dire, à l'espace que le son parcourt en $1''$. On a donc

$$v = N' L$$

Au moyen de cette équation et de la précédente, on tire

$$v' = v. \frac{N'}{N}$$

D'où il suit que, pour trouver la vitesse v' du son dans une substance solide quelconque, il suffit d'écouter le son fondamental que produit une verge de cette substance vibrant longitudinalement, et de le comparer au son fondamental que donne un tuyau ouvert de même longueur. Le rapport de ces sons, multiplié par la vitesse du son dans l'air, donne pour produit la vitesse cherchée.

Supposons, par exemple, que l'on fasse vibrer longitudinalement une verge ou une lame de bois de pin de 8 pieds de longueur, en la soutenant au milieu et en la frottant vers un de ses bouts avec un morceau de drap enduit de colophane, le son qu'elle produit se trouve à l'unisson sur le clavier avec ut^5. Or, on sait qu'un tuyau ouvert de 8 pieds produirait ut_1; ainsi, $\frac{N'}{N} = \frac{ut_5}{ut_1} = \frac{25}{2}$ $= 16$. D'où il suit que dans le bois de pin, la vitesse est 16 fois plus grande que dans l'air, ou

$$v' = 340. 16 = 5440.$$

C'est d'après une série d'expériences analogues que M. Chladni a dressé le tableau suivant :

Tableau des vitesses du son dans plusieurs substances solides.

Noms des substances.	Vitesses comparées à celles du son dans l'air.	Vitesses exprimées en mètres.
Fanon de baleine.	6 2/3.	2266
Étain.	7 1/2.	2550
Argent.	9.	3060
Bois de noyer. . .	(1) . . . 10 2/3.	3624
— d'if.		
Laiton.		
Bois de chêne. . .	. . . . . 10 2/3	3624
— de prunier. .		
Tubes de pipes de tabac. . .	10.	3400
	12.	4080
Cuivre rouge..	12.	4080
Bois de poirier. . .	. . . . 12 1/2	4250
— de hêtre rouge		
— d'érable. . . .	. . . . 13 1/3.	4532
— d'acajou. . .		
— d'ébène . . .		
— de charme. .		
— d'orme. . . .	. . . . 14 2/5.	4896
— d'aune. . . .		
— de bouleau. .		
— de tilleul. . .		
— de cerisier . .	. . . . 15.	5100
— de saule . . .		
— de pin. . . .	. . . . 16.	5440
Verre.		
Fer ou acier.. . .	. . . . 16 2/3.	5664
Bois de sapin.	18.	6120

(1) Quand les fibres de ces bois ne sont pas exactement droites, le son est plus grave quelquefois d'une tierce.

CHAPITRE VII.

De la voix et de l'ouïe.

504. *De la voix humaine.* L'organe de la voix est composé de plusieurs parties dont la forme et l'arrangement ne peuvent être étudiés d'une manière complète que par des observations anatomiques. Nous devons donc nous borner à faire comprendre d'une manière générale la disposition des diverses pièces qui concourent plus directement à la production de la voix.

On sait que la *trachée-artère* est une espèce de tube qui se termine, d'une part, à l'arrière-bouche, et de l'autre, aux poumons. Sa principale fonction est de donner passage à l'air, soit dans l'*inspiration*, soit dans l'*expiration*. Ce tube est à peu près cylindrique et composé d'anneaux fermes et cartilagineux, séparés par des anneaux membraneux flexibles. A son extrémité inférieure il se divise en deux tubes plus petits qui se portent l'un à droite et l'autre à gauche; on les appelle les *bronches;* chaque bronche, à son tour, donne naissance à plusieurs divisions et subdivisions qui vont, dans tous les sens, se ramifier dans le tissu du poumon; à son extrémité supérieure il se termine par le *larynx*, qui paraît être essentiellement l'organe de la voix.

Le *larynx* est composé de quatre cartilages : le *cricoïde*, le *thyroïde* et les deux *arithénoïdes*. Ces cartilages, de formes très-différentes, sont articulés entre eux et liés à l'anneau supérieur de la trachée-artère. Plusieurs muscles sont disposés pour donner un mouvement à leur ensemble ou pour leur imprimer des mouvemens relatifs,

C'est l'arrangement de ces muscles, et surtout des derniers, qui donne à l'organe sa forme intérieure : ils s'attachent d'abord à droite et à gauche contre les parois intérieures du tube qui forme le prolongement de la trachée-artère, et diminuent de plus en plus son diamètre transversal, tellement qu'à la fin il ne reste plus qu'une fente qui se dirige d'arrière en avant, sans être horizontale, mais en s'élevant assez rapidement; cette fente est ce que l'on nomme la *glotte :* elle a 8 ou 10 lignes de longueur; ses bords sont appelés les *lèvres* de la glotte, leur distance est très-petite en avant, mais en arrière elle est quefois de deux ou trois lignes. Au reste cette distance est très-variable; il paraît que les lèvres de la glotte peuvent se presser au point de ne laisser en arrière qu'une très-petite ouverture. Au-dessus des lèvres de la glotte, sont deux cavités, l'une à droite et l'autre à gauche, qui s'étendent latéralement à la profondeur de 8 à 9 lignes et quelquefois de 12 lignes; elles ont 5 à 6 lignes de hauteur; on les appelle les *ventricules.* Les parois supérieures des ventricules se rapprochent de manière à former en quelque sorte une seconde glotte à 5 ou 6 lignes de hauteur, au-dessus de la première. Enfin, il y a au-dessus du larynx une membrane ou plutôt un cartilage que l'on appelle *épiglotte*, il est fixé antérieurement par un de ses bords et peut s'abaisser sur la glotte.

Cette description sommaire du larynx nous permettra de comprendre les principes sur lesquels on s'appuie pour expliquer la formation de la voix.

Sans entrer ici dans le détail historique de toutes les explications plus ou moins vagues qui en ont été données, nous nous contenterons de rapporter deux opinions entre lesquelles les physiciens semblent encore partagés. Les uns considèrent l'organe de la voix comme un instrument analogue aux instrumens à anche; les autres le considèrent comme un instrument analogue aux réclames.

Pour assimiler le son de la voix au son d'*une anche*, on suppose que, pendant l'*expiration*, l'air poussé dans la trachée-artère, et pressé dans le passage étroit du larynx, ne peut pas sortir sans frotter les lèvres de la glotte et sans les mettre en vibration; ces lèvres, dit-on, vibrent alors, comme la languette d'une anche; elles vibrent toutes deux, ce qui donne au son plus d'intensité : ensuite l'épiglotte, le pharynx, le voile du palais, les fosses nasales, la langue, les dents, l'ouverture de la bouche et la disposition des lèvres, donnent au son, ainsi formé, un accent et un timbre particulier; comme le tuyau d'écoulement de l'anche donne, suivant sa forme, un timbre particulier au son qui résulte des vibrations de la languette. Le son restant le même, quant à l'intensité et au ton, pourra recevoir des modifications sans nombre, dans l'accent et le timbre, parce que toutes les pièces dont nous venons de parler peuvent elles-mêmes être modifiées par la volonté d'une infinité de manières. Un seul son, un fois expliqué, toutes les nuances des sons que la voix humaine peut produire s'expliquent aisément; car un petit mouvement de la rasette, change la longueur de la languette, et fait rendre à l'anche ordinaire un son plus grave ou plus aigu; il suffit donc de donner aux lèvres de la glotte un peu plus ou un peu moins de tension, pour que la voix parcourre successivement plusieurs octaves ascendantes ou descendantes; et même, ajoute-t-on, nous avons pour cela deux moyens, car nous pouvons non-seulement changer la tension des lèvres de la glotte, mais nous pouvons encore changer leur longueur, puisque l'ouverture de la glotte est tellement faite qu'il suffit d'un acte de la volonté pour l'agrandir ou pour la fermer presque complétement.

Ces considérations ingénieuses semblent fortifiées par quelques expériences directes. M. Magendie a mis le larynx à découvert sur des chiens vivans, et il a vu les lèvres de la glotte entrer en vibration dès que ces animaux pous-

saient des cris ; il a pu constater aussi, dans les mêmes expériences, que les lèvres de la glotte se rapprochent pour les sons aigus, et qu'elles restent au contraire plus ou moins éloignés pour les sons graves. Plusieurs observateurs ont fait des expériences analogues sur des larynx d'animaux récemment privés de la vie : en soufflant avec un fort soufflet dans la trachée-artère, ils ont obtenu des sons plus ou moins analogues à ceux que pouvaient rendre ces animaux. M. Biot, en répétant ces expériences sur un larynx de cochon, et en serrant la trachée avec la main à la hauteur de la glotte, est parvenu à imiter parfaitement le grognement d'un cochon vivant. (*Traité élém. de Phys.*, tom. I, pag. 462.)

Pour assimiler le son de la voix aux sons des *réclames*, on regarde les ventricules du larynx comme une espèce de tambour rempli d'air, et les deux glottes comme deux ouvertures correspondantes pratiquées dans les deux bases de ce tambour ; ainsi les ventricules et les deux glottes forment un véritable réclame. L'air, poussé par les poumons dans la trachée, sort avec plus ou moins de vitesse par le larynx ; il entraîne dans son mouvement une partie de l'air des ventricules, et bientôt la pression étant devenue trop faible, l'air extérieur se précipite dans la cavité des ventricules ; puis il est de nouveau entraîné au dehors, etc., exactement comme dans les réclames (490). Ces alternatives produisent un son plus ou moins aigu, suivant la rapidité avec laquelle elles se succèdent. Dans cette hypothèse, comme dans la précédente, l'accent et le timbre dépendent des vibrations des lèvres de la glotte, et de toutes les parties qui peuvent prendre diverses formes ou divers mouvemens, depuis l'arrière-bouche jusqu'aux lèvres.

Les sons différens seront produits, soit par diverses formes, que les cavités des ventricules peuvent prendre, soit par diverses dimensions des ouvertures de la glotte, soit

enfin par divers degrés de tension dans les lèvres de la glotte et dans toutes les parties du larynx et de l'arrière-bouche. M. Savart a fait plusieurs expériences qui semblent fortifier cette hypothèse. (*Ann. de phys. et de chim.*, tom. xxx, pag. 64.)

Ces deux opinions paraissent sans doute plus différentes qu'elles ne le sont en effet; mais quoique liées par des rapport intimes, elles ne peuvent pas encore dans leur ensemble donner une explication complète du phénomène de la voix. On doit les considérer comme des aperçus heureux qui pourront un jour conduire à la vérité.

505. *De la voix des oiseaux.* Chez les oiseaux, l'organe la voix n'est pas à l'arrière-bouche, mais il se trouve au contraire à l'extrémité inférieure de la trachée, là où elle se bifurque pour donner naissance aux bronches. M. Cuvier a fait voir, en effet, qu'un canard qui vient d'avoir la tête tranchée pousse encore pendant quelques instans des cris très-forts et très-bien articulés; et la même expérience peut-être faite sur la plupart des oiseaux. L'observation anatomique confirme ce résultat, car, en suivant l'organisation de la trachée, on trouve qu'à son extrémité supérieure elle se termine en général par un simple rétrécissement, ou par une espèce de glotte qui n'offre aucune des dispositions nécessaires à la production des sons; tandis qu'à son extrémité inférieure elle présente un appareil très-complexe et merveilleusement ajusté pour produire une longue série de sons graves ou aigus; mais, comme il nous serait impossible d'en donner une idée sans entrer dans les détails anatomiques qui nous écarteraient trop de notre plan, et comme, d'une autre part, il se présente encore de grandes difficultés dans les théories qui ont été proposées jusqu'à présent pour expliquer tous les phénomènes qui résultent de cette organisation, nous nous contenterons de renvoyer aux ouvrages qui ont été publiés sur ce sujet et particulièrement aux Mé-

moires de M. Savart. (*Annales de phys. et de chim.*, tom. XXXII.)

506. *De l'organe de l'ouïe.* La seule partie extérieure de cet organe est le *pavillon*, dont les replis et les contours ne sont, comme on sait, que l'épanouissement du *conduit auditif*. Ce conduit, après s'être enfoncé à une petite profondeur, est terminé obliquement par une membrane mince, mobile et élastique que l'on appelle la *membrane du tympan*. Derrière cette membrane est la *caisse du tympan;* c'est une cavité osseuse, tapissée de diverses membranes et remplie d'air; elle est fermée de toutes parts, excepté en un point où aboutit la *trompe d'Eustache* qui part de l'arrière-bouche; par ce moyen l'air peut se renouveler et se mettre sans cesse en équilibre avec la pression atmosphérique. On distingue encore dans la caisse du tympan deux ouvertures fermées par des membranes, savoir: la *fenêtre ovale* en haut, et plus bas la *fenêtre ronde*. Enfin, dans l'intérieur même de cette caisse est suspendue *la chaîne des osselets*, qui se compose de quatre petits os irréguliers, que l'on appelle par analogie de forme le *marteau*, l'*enclume*, le *lenticulaire* et l'*étrier*. Le marteau est attaché longitudinalement sur la membrane du tympan, il forme une espèce de rayon solide, qui vient de la circonférence au centre. A son autre extrémité il se lie à l'enclume, l'enclume au lenticulaire, et le lenticulaire à l'étrier, qui va s'attacher sur la membrane de la fenêtre ovale : plusieurs muscles agissent sur cette chaîne pour la tendre ou la relâcher, et, par conséquent, pour tendre et relâcher en même temps la membrane du tympan et celle de la fenêtre ovale. La membrane de la fenêtre ronde sépare la caisse du tympan d'un conduit osseux, contourné en spirale, qui se nomme le *limaçon;* l'autre extrémité de ce conduit s'ouvre dans une cavité qui s'appelle le *vestibule*. Le vestibule est séparé de la caisse du tympan par la membrane de la fenêtre ovale; enfin il communique avec trois

canaux osseux, que l'on nomme canaux semi-circulaires, et qui sont remplis d'une matière grisâtre dont l'usage est inconnu.

Le vestibule et les spires du limaçon sont remplis d'un liquide transparent que l'on appelle *liquide de cotunni*; c'est dans ce liquide que viennent flotter les derniers filets du *nerf acoustique*.

D'après cette disposition de l'organe on peut remarquer d'abord que, si la trompe d'Eustache n'établissait pas une communication libre, entre l'air de l'arrière-bouche et celui de la caisse du tympan, il y aurait des inégalités de pression qui donneraient à la membrane du tympan des tensions différentes; cette circonstance, qui se présente quelquefois par accident ou par suite de maladie, est en général accompagnée de bourdonnemens plus ou moins incommodes.

En supposant que la membrane du tympan ait une tension convenable, on conçoit qu'elle entre en vibration dès qu'une onde sonore vient la frapper, et si plusieurs ondes viennent la frapper à la fois elle se met à l'unisson avec chacune d'elles, comme ferait une membrane inerte; ces vibrations *coexistantes* sont faciles à concevoir, d'après ce que nous avons dit précédemment. Ce fait est à peu près tout ce que l'on sait de certain sur le phénomène de l'audition.

Comment ces vibrations sont-elles transmises au nerf acoustique? quels rôles jouent dans cette transmission la chaîne des osselets, le limaçon et les canaux semi-circulaires? Ces questions restent sans solution ainsi que beaucoup d'autres que l'on peut se proposer sur ce sujet.

On sait cependant que la membrane du tympan peut être enlevée et même que la chaîne des osselets peut être rompue sans que l'organe cesse de remplir ses fonctions; et que, réciproquement, l'on peut être affecté de surdité complète, sans qu'il y ait aucune trace apparente de dé-

sordre dans les diverses pièces qui composent l'oreille.

On suppose que le pavillon sert à renforcer les sons et à juger de leurs directions, sans qu'il soit possible d'assigner précisément comment il remplit ce double but.

On suppose enfin que la chaîne des osselets peut servir à éviter les sensations trop vives, et qu'il suffit, par son moyen, de tendre fortement la membrane du tympan pour amortir à un haut degré le bruit trop violent qui viendrait la frapper. Quelques personnes prétendent en effet qu'elles peuvent se rendre sourde à volonté. Mais il nous reste encore beaucoup de vérités importantes à découvrir sur ce sujet.

FIN DU SEPTIÈME LIVRE.

LIVRE HUITIÈME.

OPTIQUE.

Notions générales sur la propagation de la lumière.

507. Les expériences les plus simples et les plus familières nous apprennent qu'un *corps lumineux* quelconque propage la lumière dans tous les sens ; car, la flamme d'une bougie, par exemple, serait visible de tous les points d'une sphère dont elle occuperait le centre ; il en serait de même d'un corps phosphorescent, d'une étincelle électrique ou d'un boulet porté au rouge par l'action du feu. Ce qui se montre en petit, dans nos expériences habituelles, se manifeste en grand dans l'immense étendue du ciel : le soleil répand de toutes parts le même éclat dans l'espace, et sa lumière brille à la fois sur la terre, sur les planètes, sur les comètes, et sur tous les corps du firmament, quel que soit le point qu'ils occupent dans la sphère infinie du monde.

Les corps lumineux sont essentiellement composés de matière pondérable : nous verrons que, sans matière, il n'y a point de lumière possible; le *vide*, tel que nous l'avons défini (20), peut bien propager la lumière, mais non lui donner naissance. Il en résulte que les corps lumineux peuvent être divisés en fragmens pondérables de plus en plus petits, et les derniers fragmens que nous

puissions physiquement concevoir sont ce que l'on appelle des *points lumineux*. Ainsi, comme un corps ordinaire est une réunion de molécules ou d'atomes, un corps lumineux est une réunion de points lumineux.

Chaque point lumineux répand de la lumière dans tous les sens ; car on distingue très-bien la flamme d'une bougie au travers de la flamme d'une autre bougie ; et quand les deux flammes se touchent, on reçoit, en les regardant de profil, une impression plus vive qu'en les regardant de face. Cette expérience est surtout frappante dans l'éclairage au gaz, lorsqu'on observe une nappe de flamme en éventail : de face la lumière est tolérable, de profil elle est éblouissante. Dans un boulet chauffé au rouge, on ne peut guère douter que les points du centre ne propagent de la lumière comme ceux de la surface ; cependant cette lumière n'arrive pas à l'œil, elle est absorbée dans l'épaisseur de la matière ; il en est de même de la lumière qui est propagée en dedans par les points de la surface. Ainsi par sa nature la lumière se répand toujours dans tous les sens, mais elle n'est pas toujours transmise dans tous les sens avec la même facilité.

508. *Dans un milieu homogène la lumière se propage toujours en ligne droite.* En disposant, par exemple, sur une longue règle, trois disques percés en leur centre d'un trou très-petit, on voit à une grande distance la flamme d'une bougie, ou bien on cesse de l'apercevoir, suivant que les trous sont ou ne sont pas en ligne droite. On conçoit qu'il y a une foule de moyens, indépendans de la lumière, pour s'assurer que trois points sont en ligne droite. Quand la lumière vient rencontrer une glace polie ou un miroir de métal MM', suivant la direction LI, par exemple (*Fig.* 131), elle est renvoyée suivant une autre direction IK, et continue de se mouvoir en ligne droite suivant cette nouvelle direction tant qu'elle reste dans un milieu sensiblement homogène.

Cette déviation que la lumière éprouve en tombant sur des surfaces polies s'appelle la *réflexion* de la lumière.

509. *Dans un milieu hétérogène la lumière se meut toujours en ligne courbe :* ainsi l'atmosphère, par exemple, formant un milieu hétérogène à cause de l'inégale densité de l'air, la lumière du soleil ne nous arrive jamais en ligne droite, et il en résulte que nous ne voyons jamais cet astre au lieu où il est en réalité. Nos observations sur les étoiles et sur tous les corps très-élevés ou très-éloignés sont accompagnées des mêmes illusions.

Quand la lumière passe de l'eau dans l'air ou de l'air dans l'eau, l'hétérogénité des milieux qu'elle traverse est encore plus grande; aussi la *déviation* des objets est encore plus frappante : pour s'en assurer il suffit de prendre un vase vv′ (*Fig.* 132), de placer l'œil en o de manière que l'on aperçoive à peine le premier bord d'une pièce de monnoie mm′, le reste étant caché par le bord b, et de verser ensuite de l'eau dans le vase; à mesure que le niveau s'élève, la pièce mm′ semble s'avancer vers le centre, et l'on parvient enfin à l'apercevoir dans toute sa largeur, quoique en réalité elle continue d'être cachée par le bord du vase. Donc, la lumière ne vient pas en ligne droite de la pièce mm′ vers l'œil : mais elle se propage en ligne droite dans l'eau et en ligne droite dans l'air, car chacun de ces milieux est sensiblement homogène dans une si petite épaisseur, et nous démontrerons plus tard qu'elle suit alors une *ligne brisée* analogue à mio.

Au moyen de l'air atmosphérique, nous voyons déjà les astres avant leur lever et nous les voyons encore après leur coucher; c'est un résultat analogue au précédent, car nous apercevons la pièce mm′ au moyen de l'eau, bien qu'elle soit cachée par le bord du vase comme le sont les astres par les montagnes ou les plaines qui limitent notre horizon. Il y a seulement cette différence qu'en traversant les couches successives de l'atmosphère, la lumière ne rencon-

trant pas de changemens brusques de densité, ne se brise pas brusquement, comme elle fait en passant de l'eau dans l'air, et alors elle suit une ligne courbe au lieu d'une ligne brisée.

Cette déviation que la lumière éprouve en traversant des milieux hétérogènes s'appelle *la réfraction*.

510. Un *rayon lumineux* ou un *rayon de lumière* est la direction que suit la lumière en se propageant. — Un *pinceau* est la réunion de plusieurs rayons voisins. — Un *faisceau* est la réunion de plusieurs rayons ou de plusieurs pinceaux voisins ou séparés.

Si d'un point quelconque de la flamme d'une bougie l'on conçoit des lignes droites dans toutes les directions, suivant chacune de ces lignes droites il y aura un rayon de lumière, puisque la lumière se propage dans tous les sens et en ligne droite; mais lorsqu'on s'éloignera assez de la flamme pour que le milieu devienne sensiblement hétérogène, les rayons de lumière commenceront à se courber, et les lignes droites primitives ne représenteront plus leurs directions.

Quand la lumière se propage dans un milieu homogène autour d'un point lumineux, et qu'on la reçoit sur une surface quelconque, l'on a coutume de dire que cette surface est éclairée par un pinceau lumineux quand elle est petite, et par un faisceau lumineux quand elle est plus grande. Alors on regarde cette surface comme la base d'un cône dont le point lumineux est le sommet, et la lumière du pinceau ou du faisceau est la lumière comprise dans le cône. Mais quand la lumière passe dans un milieu hétérogène, tous les rayons d'un même faisceau commencent à se propager suivant des lignes courbes, et en général suivant des lignes courbes différentes, et il n'est plus vrai de dire alors que le faisceau est un cône droit.

Un pinceau ou un faisceau de lumière est naturellement *divergent*, c'est-à-dire que sa section est d'autant plus

grande qu'elle s'éloigne davantage du point lumineux. Cependant, quand le point lumineux est très-éloigné on dit que le faisceau est *parallèle*, parce que toutes les sections sont sensiblement égales, ou, ce qui revient au même, tous les rayons sont sensiblement parallèles. Ainsi, par exemple, la lumière que nous envoie le centre du soleil forme un faisceau parallèle, car deux lignes qui sont à la surface de la terre distantes de quelques pouces, ou même de quelques lieues, et qui vont se rencontrer au centre du soleil, sont deux lignes parallèles.

Les faisceaux de lumière naturelle, convenablement modifiés, peuvent devenir des *faisceaux convergens*, c'est-à-dire que les rayons sont ramenés dans une telle direction qu'ils concourent tous au même point. Ce point de concours de tous les rayons d'un faisceau se nomme un *foyer*. Mais c'est une chose digne de remarque qu'après s'être ainsi rassemblés et concentrés en un foyer, tous les rayons continuent leur route, comme si chacun d'eux était seul, d'où il suit qu'au-delà du foyer, le faisceau devient divergent, comme un faisceau naturel.

511. *L'intensité de la lumière d'un point lumineux décroît comme le carré de la distance augmente.*

On sait que les sections AB et A′B′ d'un cône droit (*Fig.* 133), sont entre elles comme les carrés des distances au sommet sc et sc′; sc′ étant, par exemple, double de sc, la section A′B′ sera quadruple de la section AB. Or, ce cône étant un faisceau lumineux, il est évident que la lumière qui passe en AB est la même que celle qui passe en A′B′, et puisqu'ici elle est répandue par un espace quadruple, elle doit en éclairer chaque partie avec une intensité quatre fois moindre.

Cette proposition ne s'applique pas rigoureusement à un corps lumineux d'une grande étendue, dont on recevrait la lumière à de petites distances. Car le point s′ n'éclaire pas AB tandis qu'il éclaire A′B′, et les points qui se-

raient compris entre s et s′ enverraient tous en A′B′ plus de lumière qu'en AB ; par conséquent un corps lumineux qui s'étendrait de s et s′ donnerait sur AB un éclat qui ne serait pas quadruple de celui qu'il donnerait sur A′B′.

512. Les corps qui ne sont pas lumineux par eux-mêmes se distinguent en *corps opaques*, comme le bois, la pierre et les métaux ; *corps diaphanes* ou *transparens*, comme l'air, l'eau et le verre ; et *corps translucides*, comme le papier mince et le verre dépoli.

Les *corps opaques* ne transmettent point de lumière au travers de leur masse. Mais l'opacité est plutôt dépendante de l'épaisseur que de la nature des substances, car tous les corps réduits en lames ou en feuilles assez minces laissent passer une partie de la lumière qu'ils reçoivent ; ainsi, au travers d'une feuille d'or collée sur du verre on distingue une lueur verdâtre très-sensible, lorsqu'on regarde une bougie ou même la lumière du ciel ou des nuées.

Les *corps diaphanes* transmettent la lumière et laissent apercevoir nettement au travers de leur substance toutes les formes des objets. Les gaz, les liquides et la plupart des corps cristallisés semblent, en général, avoir une diaphanéité parfaite lorsqu'ils sont en petite masse ; car ils sont absolument incolores et ils laissent apercevoir non-seulement les formes des objets, mais encore toutes les nuances de leurs couleurs. Cependant les plus diaphanes de ces corps deviennent colorés quand ils ont une épaisseur suffisante, et c'est une preuve qu'ils absorbent alors une partie de la lumière qui les traverse. Ainsi, une goutte d'eau est parfaitement limpide ; l'eau prise en masse est bleue ou verte, et l'on calcule qu'un observateur qui serait plongé à 150 pieds de profondeur dans la mer la plus diaphane, ne trouverait pas plus d'éclat à la lumière du soleil que nous n'en trouvons à la lumière de la lune.

Les *corps translucides* laissent passer une partie de la

lumière qu'ils reçoivent, mais ils ne laissent distinguer ni la couleur, ni la distance, ni la forme des objets. Dans le langage ordinaire, le mot transparent s'applique souvent aux corps translucides comme aux corps diaphanes.

513. De *l'ombre* et de la *pénombre*. Quand un corps opaque est éclairé par un seul point lumineux, la forme de l'ombre qui en résulte est facile à trouver : en effet, si l'on conçoit une ligne droite qui passe par le point lumineux et qui fasse une révolution autour du corps en s'appuyant sans cesse sur son bord, cette ligne décrit une espèce de surface conique dont le prolongement au-delà du corps donne la trace du contour de l'ombre, *Fig.* 134. Nous devons prévenir cependant que cette *ombre géométrique* ne coïncide jamais avec l'*ombre physique*, parce que la lumière se *diffracte* ou semble *s'infléchir* en passant près des limites des corps, et l'effet de cette diffraction est toujours de faire paraître de la lumière dans une partie plus ou moins grande de l'ombre géométrique et de faire paraître, au contraire, de l'ombre au-dehors.

Ce qui précède s'applique à un assemblage quelconque de points lumineux, mais alors on distingue l'ombre et la *pénombre*. L'ombre est encore le lieu de l'espace qui ne reçoit aucune lumière, et la pénombre est l'ensemble des lieux qui sont dans l'ombre par rapport à quelques-uns des points, tandis qu'ils reçoivent la lumière des autres.

La lumière qui pénètre par une petite ouverture dans une chambre noire, c'est-à-dire, dans un espace exactement fermé de toutes parts, présente aussi des phénomènes d'ombre et de pénombre. Par exemple, vv′, (*Fig.* 135), étant la petite ouverture pratiquée au volet, le faisceau qui vient du point lumineux L et qui pénètre dans la chambre est un cône indéfini, ayant L pour sommet et v v′ pour base. La surface de ce cône est la limite géométrique qui sépare la lumière de l'ombre absolue ; mais dans ce cas, comme dans le précédent, l'ombre physique est loin de coïncider

avec l'ombre géométrique, car on observe de la lumière au dehors du cône et de l'ombre au dedans. Pour prendre une idée plus nette de ce phénomène de diffraction, supposons que l'ouverture soit circulaire et de deux ou trois millimètres de diamètre, que le point lumineux n'envoie que de la lumière rouge et qu'on aille présenter au faisceau un grand tableau blanc à deux ou trois mètres dans l'intérieur de la chambre; alors, au lieu d'avoir sur ce tableau une tache circulaire rouge environnée d'ombre complète, telle que BB', (*Fig.* 136), on aura, au contraire, des anneaux alternativement rouges et noirs (*Fig.* 137), soit au dedans, soit au dehors de la base géométrique du cône LBB', (*Fig.* 135). Quand le point lumineux envoie de la lumière blanche ordinaire, alors, au lieu de ces alternatives d'ombre et de lumière, on distingue simplement des anneaux colorés où diverses nuances se succèdent à de petits intervalles. Une ouverture très-grande produit encore des phénomènes analogues, mais seulement à une petite distance autour de la limite géométrique de l'ombre. Cependant nous devons pour le moment faire abstraction de ces effets remarquables, et supposer d'abord que la lumière se propage géométriquement en ligne droite, sans être modifiée ou diffractée près des limites des corps.

Dans cette hypothèse, chaque point lumineux donnant un faisceau brusquement séparé de l'ombre, il est clair que plusieurs points lumineux, tels que L, L', L'', (*Fig.* 138), donneraient dans la chambre noire des faisceaux qui se propageraient comme s'ils étaient seuls, et qu'il en résulterait des espaces diversement éclairés. En A, par exemple, il arriverait des rayons des trois points lumineux, en C des rayons de deux points seulement, en D des rayons d'un seul point; et les espaces E seraient complétement dans l'ombre, comme les espaces extérieurs F.

Mais si l'on suppose que L'L'' est le diamètre d'un disque dont tous les points soient également lumineux, il y aura

dans la chambre noire un grand faisceau v v′ B B′ composé d'un nombre infini de faisceaux venant chacun d'un point différent, et le cercle dont B B′ est le diamètre se trouvera inégalement éclairé dans tous ses points. Pour savoir, par exemple, quelle est la lumière qui arrive en K, il faut alors regarder ce point comme le sommet d'un cône ayant pour base v v′, et tous les points du disque lumineux que ce cône prolongé vient envelopper donnent de la lumière au point K, les autres n'en donnent pas.

Cette construction peut s'appliquer au disque du soleil; seulement, au lieu d'un faisceau conique, chaque point de cet astre envoie un faisceau parallèle, (*Fig.* 139); C C′ est le faisceau envoyé par le centre, S S′ le faisceau envoyé par le bord supérieur, et I I′ le faisceau envoyé par le bord inférieur. L'angle S O I, ou son égal, S′ O′ I′ est de 32′ environ, car c'est sous cet angle que nous apercevons le disque du soleil. Un point K étant donné, sur une section B B′ du faisceau de la chambre noire, il est facile, d'après ce que nous venons de dire, de déterminer quels sont les points du soleil dont il reçoit des rayons; et l'on calculerait aisément à quelle distance du volet le point central M cesse de recevoir les rayons des bords.

Les esprits les moins attentifs ne manquent pas d'observer une foule de phénomènes qui s'expliquent au moyen des notions précédentes. Nous en indiquerons ici quelques exemples.

1° Lorsqu'on fait entrer dans la chambre noire un faisceau de lumière solaire par une petite ouverture de forme quelconque, ce faisceau donne toujours une image parfaitement ronde, en tombant perpendiculairement sur un tableau à une distance suffisante du volet. Supposons, par exemple, que l'ouverture soit un carré A B C D, (*Fig.* 140); chaque point du soleil donne dans la chambre noire un faisceau carré dont la section perpendiculaire est partout égale à A B C D, et pour avoir le contour de l'image, il suffit de

concevoir que l'un de ces faisceaux tourne dans l'ouverture en s'appuyant sur les bords de l'astre. Ainsi, quand l'image sera reçue à une distance assez grande par rapport à la grandeur de l'ouverture, son contour extérieur sera toujours semblable au contour extérieur du corps lumineux, quelle que soit la forme de l'ouverture. Pendant une éclipse, l'image du soleil dans la chambre noire est tantôt annulaire, tantôt en forme de croissant, etc.; elle est toujours parfaitement semblable à la portion du disque qui n'est pas cachée. Des phénomènes analogues peuvent s'observer sous les ombrages des arbres touffus et élevés : les rayons qui passent entre les feuilles viennent peindre sur le sol des images *elliptiques* du soleil, quand ils tombent obliquement, et des images rondes, quand ils tombent perpendiculairement; au moment des eclipses ces images prennent aussi différentes formes suivant l'obliquité du sol.

2° Pendant une belle nuit, toutes les étoiles qui brillent dans la voûte du ciel, vont peindre leurs images dans l'intérieur d'une chambre noire dont l'ouverture est très-petite. Chaque étoile, en effet, donne un faisceau parallèle, dont toutes les sections parallèles au volet sont égales à l'ouverture; ces faisceaux, en tombant sur une surface blanche avec des obliquités différentes, donnent des images dont le contour et la grandeur sont faciles à déterminer.

3° Pendant le jour on distingue dans l'intérieur de la chambre noire, une image renversée du ciel, des nuages, de l'horizon et de tous les objets qui sont au-devant de la petite ouverture. Chaque point d'un arbre, par exemple, envoie un faisceau sensiblement parallèle, dont la section est d'un millimètre si l'ouverture n'a qu'un millimètre de diamètre; ainsi, sur le mur ou sur le tableau de la chambre noire, les faisceaux A A et B B′ de deux points voisins, (*Fig.* 142), se superposent en partie et d'autant plus que le tableau est plus près de l'ouverture; tandis que les

faisceaux AA′ et CC′ de deux points un peu éloignés se dégagent l'un de l'autre pour former des images distinctes de ces points. On aura donc une image renversée de l'ensemble qui sera toujours un peu confuse vers les bords, mais d'autant moins que l'ouverture sera plus petite et le tableau plus éloigné. On voit en même temps, sur la *Fig.* 142, la cause du renversement.

514. Les notions précédentes peuvent nous donner une première idée du phénomène de la vision. L'œil, comme nous le verrons, est un appareil analogue à une chambre noire : l'ouverture de la *pupille* donne passage aux faisceaux de lumière, et le réseau nerveux de la *rétine* qui tapisse le fond de l'œil est comme le tableau sur lequel viennent se peindre les images ; mais pour qu'un seul point d'un objet extérieur n'ébranle qu'un seul point de la rétine, il y a, derrière la pupille, un corps de forme lenticulaire et presque solide, nommé *cristallin*, qui concentre les rayons d'un même faisceau et les fait converger tous exactement sur le même point de la rétine. Ainsi, quand nous regardons un point éloigné, nous voyons chacun de ses points par deux cônes de lumière, opposés à leur base ; le premier de ces cônes est *divergent*, son sommet est au point que l'on regarde, et sa base a pour largeur l'ouverture de la pupille ; le deuxième est *convergent*, et pour que la vision soit parfaitement nette son sommet doit tomber exactement sur la pupille. Quand nous regardons un objet plus ou moins étendu, le même phénomène se produit pour chacun des points visibles de sa surface. C'est par cette disposition organique, si simple dans son principe et si merveilleuse dans ses détails, que tous les objets du plus vaste paysage viennent dans un instant imperceptible se peindre à la fois sur la rétine, avec toutes les variétés de leurs formes et tout l'éclat de leurs couleurs.

Comme nous jugeons de la situation d'un point dans

l'espace par le lieu de son image sur la rétine et par la direction que nous donnons à l'œil pour la recevoir, il en résulte que par une habitude constante nous supposons toujours que le point dont les rayons nous affectent est situé au sommet extérieur du cône qui peut *directement* donner naissance au cône intérieur de lumière. Ce principe habituel de nos jugemens est la source de toutes les *illusions* d'optique qui tiennent à la situation des objets. Ainsi, le point A, (*Fig.* 143), fait son image au point A′ au moyen des deux cônes opposés PAP′ et PA′P′; mais si la lumière, au lieu de venir à l'œil en ligne droite, se trouve brisée ou déviée par quelque cause, un point placé en B, par exemple, ou en C pourrait donner naissance au même cône intérieur PA′P′ et à la même image A′, et alors nous jugerions faussement que ces points sont A, sans qu'il y ait aucune donnée pour faire cesser notre illusion, car, les faisceaux de lumière des points C et B, venant enfin se confondre dans leur direction avec le faisceau qui serait parti du point A, rien ne peut nous avertir des divers changemens de route qu'ils ont pu subir. Il est donc vrai de dire que, par l'organe de la vue, *nous jugeons toujours en ligne droite*, et que nos jugemens sont inévitablement faux toutes les fois que la lumière éprouve la plus légère déviation entre l'objet qui l'envoie et l'œil qui la reçoit.

515. *La lumière se propage avec une si grande vitesse, qu'elle vient du soleil à la terre en* 8′ 13″. C'est par l'observation des éclipses du premier satellite de Jupiter que Roemer fut conduit à cette importante découverte, en 1675 et 1676; car il ne fallut pas moins d'une année pour la bien constater. La *Fig.* 141 pourra donner une idée de ces observations. S est le lieu du soleil, TABMCD l'orbite de la terre et J la position de Jupiter. Supposons que Jupiter soit dans le plan de l'écliptique comme il est représenté dans la figure, qu'il reste immobile pendant une révolu-

tion entière de la terre, et que le premier satellite tourne dans le cercle EIGH; ce cercle, le diamètre de Jupiter et le cône d'ombre qu'il projette derrière lui sont ici fort amplifiés. Pendant une moitié de l'année, quand la terre parcourt la partie TABM de son orbite, nous pouvons observer les *émersions* du premier satellite, c'est-à-dire, le moment où il sort de l'ombre, et pendant l'autre moitié nous pouvons observer ses *immersions*, c'est-à-dire le moment où il se plonge dans l'ombre. L'intervalle de deux immersions ou de deux émersions successives est la durée d'une révolution. Quel que soit le point de l'orbite de la terre d'où l'on fasse les observations, cette durée est toujours de $42^h\ 28'\ 35''$ ou environ $42^h\ 1/2$. Par conséquent, si du point A, par exemple, on observe une émersion, à un instant donné on peut prédire que la 100e émersion suivante aura lieu précisément après 100 fois $42^h\ 28'\ 35''$, et qu'elle sera vue du point B où le globe de la terre sera alors parvenu par son mouvement de translation. Or, on trouve par expérience qu'elle arrive toujours *un peu plus tard*, et l'on en conclut que la différence est le temps que met la lumière pour passer de A en B; on en déduit la vitesse de propagation, en divisant la distance connue AB par le retard observé. Cette conclusion se trouve vérifiée pendant la seconde moitié de l'année; car si l'on observe une immersion du point C, par exemple, la 100e immersion suivante devrait avoir lieu après 100 fois $42^h\ 28'\ 35''$, quand le globe de la terre serait parvenu en D. Or, on trouve par expérience qu'elle arrive *un peu plus tôt*, et cette *avance* est précisément le temps que met la lumière pour passer de D en C. C'est par des observations semblables et souvent répétées que l'on a pu constater enfin que la lumière parcourt en $1''$ près de 80,000 lieues ou 79,572 lieues de 2000 toises, et qu'elle met $8'\ 13''$ à venir du soleil à la terre.

Il est facile d'après cela de calculer le temps que met

la lumière pour aller du soleil aux diverses planètes. Voici le tableau des résultats :

Planètes.	Distance moyenne des planètes au soleil en lieues de 2000 toises.	Temps que met la lumière pour aller du soleil aux planètes.
Mercure. . . .	15,185,465	0h 3′ 10″
Vénus.	28,375,600	0 5 56
Mars.	59,772,960	0 12 31
Vesta.	92,705,600	0 19 25
Junon.	104,755,000	0 21 57
Cérès.	108,555,500	0 22 44
Pallas.	108,738,000	0 22 46
Jupiter.	204,100,280	0 42 45
Saturne. . . .	374,196,340	1 18 23
Uranus. . . .	752,540,172	4 9 48

Le temps que la lumière emploie pour venir, par exemple, d'Uranus à la terre est tantôt moindre, tantôt plus grand que $4^h\ 9'\ 48''$, suivant les positions relatives de ces deux planètes ; mais on peut dire, sans trop s'écarter de la vérité, que l'astronome qui regarde le globe d'Uranus ne le voit pas où il est, mais où il était 4^h auparavant, et que si cette planète était anéantie à un instant donné, on la verrait encore pendant 4^h après qu'elle aurait cessé d'être.

Nous ne savons pas à quelle distance de la terre sont dispersées les étoiles, mais nous savons avec certitude qu'il n'y a pas un de ces astres qui ne soit au moins à 200,000 fois la distance du soleil à la terre, et dont la lumière, par conséquent, ne mette pour arriver à nous au moins 200,000 fois $8'\ 13''$, c'est-à-dire, 1141 jours ou 3 ans et 45 jours, et, sans doute, il n'y a pas d'exagération à supposer que nous voyons des étoiles qui sont quelques centaines de millions de fois plus éloignées et dont la lumière met par conséquent quelques millions de siècles à venir jusqu'à nous. Tout ce qui existe dans le ciel, au-delà de notre système, pourrait être brisé, confondu, anéanti, et nous,

habitans paisibles de la terre, nous passerions encore de nombreuses années à contempler comme aujourd'hui ce grand spectacle d'ordre et de magnificence qui ne serait plus alors qu'une illusion trompeuse, une image sans réalité.

La matière pondérable paraît par sa nature n'être pas susceptible d'un mouvement aussi rapide que le mouvement de la lumière. Les plus grandes vitesses que nous puissions observer à la surface de la terre, sont celles qui résultent de l'explosion des poudres fulminantes, ou des actions mécaniques les plus violentes. Or, un boulet qui sort du canon parcourt tout au plus deux ou trois mille pieds par seconde, c'est-à-dire, qu'en conservant toute sa vitesse il ferait en un an beaucoup moins de chemin que la lumière en 1″. Si nous passons du mouvement de petites masses pondérables à celui des grandes masses qui composent les corps célestes, nous reconnaîtrons facilement que de tous les astres de notre système, c'est Mercure qui a le mouvement de translation le plus rapide, et cependant son centre ne parcourt que 12 lieues et 3/10 en 1″. Le centre de Vénus fait $9^{\text{lieues}},15$, et celui de la terre $7^{\text{lieues}},74$. Pour les vitesses qui résultent des mouvemens de rotation autour de l'axe, ce sont les points de l'équateur de Jupiter qui reçoivent la plus grande, et ils ne parcourent en 1″ que $3^{\text{lieues}},1$. Ainsi, sur la terre et sur les autres planètes, par l'action des forces artificielles les plus promptes et par celle des forces naturelles les plus puissantes, la matière pondérable ne peut recevoir qu'une vitesse qui est toujours cinq ou six mille fois moindre que la vitesse de la lumière. Ce résultat nous annonce d'une manière assez frappante que, si la lumière est un mouvement, elle est sans doute le mouvement d'une substance essentiellement différente de la matière pondérable.

516. Pour entrer maintenant dans l'étude de l'optique, c'est-à-dire, dans l'étude des modifications diverses que

les corps peuvent imprimer à la lumière, nous distinguerons les propriétés qui sont relatives seulement à la direction des faisceaux lumineux, et celles qui sont essentielles aux rayons eux-mêmes et indépendantes de leur direction. Nous étudierons la première partie sous le titre général de *lumière non polarisée*, et la deuxième sous le titre de *lumière polarisée*.

PREMIÈRE PARTIE.

LUMIÈRE NON POLARISÉE.

CHAPITRE PREMIER.

De la catoptrique ou de la réflexion de la lumière.

517. *De la réflexion de la lumière sur une surface plane.* Lorsqu'on fait tomber dans la chambre noire un faisceau de lumière solaire LL′, (*Fig.* 144), sur un miroir poli de métal MM′, on observe en général deux phénomènes remarquables : 1° on distingue dans une direction déterminée un faisceau RR′ qui semble partir du miroir et qui trace sur les corps qu'il rencontre une image brillante du soleil ; tous les rayons de ce faisceau sont des rayons *régulièrement* réfléchis ; ils ont d'autant plus d'éclat que le miroir est mieux poli ; 2° des divers points de la chambre noire on distingue la portion du miroir sur laquelle tombe la lumière ; les rayons ID, ID′, ID″, etc., qui sont ainsi dispersés dans tous les sens, sont des rayons *irrégulièrement* réfléchis ; ils ont d'autant plus d'éclat que le miroir est moins poli.

Pour rendre l'expérience plus frappante on peut diriger sur le miroir le souffle de l'haleine ou former près de la surface un petit nuage de poussière, en secouant une

éponge remplie de poudre de lycopode ou de craie pulvérisée.

L'angle LIP qu'un rayon incident LI fait avec la normale IP au point d'incidence I se nomme *angle d'incidence*.

L'angle RIP qu'un rayon réfléchi RI fait avec la normale IP au point d'incidence se nomme *angle de réflexion*.

Le plan formé par l'angle d'incidence se nomme *plan d'incidence*.

Le plan formé par l'angle de réflexion se nomme *plan de réflexion*.

Ces définitions s'appliquent à tous les rayons incidens et réfléchis ; mais nous ne devons nous occuper en ce moment que de la *réflexion régulière*, et voici les lois suivant lesquelles elle s'accomplit.

1° *Le plan de réflexion coïncide avec le plan d'incidence.*

2° *L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence et situé de l'autre côté de la normale.*

Ces deux vérités fondamentales peuvent être démontrées par une seule expérience que les astronomes ont occasion de répéter souvent et avec des instrumens d'une grande précision.

Autour du centre C, (*Fig.* 147), d'un grand cercle vertical V V′, se meut une lunette L avec laquelle on observe les étoiles. D'abord, on fait une observation par la lumière directe ED, ensuite on en fait une autre par la lumière E′I R qui est réfléchie sur la surface tranquille d'un vase plein de mercure, et l'on trouve constamment que l'angle DCP est égal à l'angle PCO′. Or, les verticales PC et IP′ étant parallèles, ainsi que les rayons ED et E′I qui viennent d'une même étoile, il est évident que les angles DCP et PCO′ sont respectivement égaux aux angles E′IP′ et P′IR, et que par conséquent ceux-ci sont égaux entre eux ; et il

est évident en outre que le plan d'incidence E′ I P′ coïncide avec le plan de réflexion P′ I R.

Il n'est pas nécessaire de prouver directement que le rayon I R provient de E′ I, puisqu'au point I il ne peut tomber qu'un rayon parallèle à E D.

Au lieu d'une lunette adaptée au cercle on pourrait se servir, comme les anciens astronomes, d'un simple *tube droit*, (*Fig.* 145), ou d'une *alidade*, (*Fig.* 146), portant deux *pinules* dont les trous U et U′ fussent sur une ligne exactement parallèle au *limbe* du cercle V V′.

Ces deux lois de la réflexion sont tout-à-fait générales et ne souffrent aucune exception ; elles sont vraies pour la lumière naturelle qui nous vient des astres et pour la lumière artificielle que nous pouvons produire par la combustion, par les actions chimiques, la phosphorescence, l'électricité, etc. Elles sont vraies pour la lumière directe et pour la lumière diffuse qui nous fait voir les corps et toutes leurs couleurs diverses; enfin elles sont complètement indépendantes de la nature des substances sur lesquelles la réflexion s'opère, car elles se vérifient avec la même exactitude, sur les métaux et les pierres précieuses, sur les solides et les liquides, en un mot sur toutes les surfaces réfléchissantes, quelle que puisse être la matière pondérable qui les compose.

Au moyen de ces principes il est facile de démontrer que les miroirs plans doivent nous faire voir des *images* des objets, et que ces images sont toujours *symétriques* des objets par rapport au plan du miroir.

En effet, soit M M′ un miroir plan, (*Fig.* 148), et L un point lumineux; du point L abaissons sur la surface du miroir ou sur son prolongement une perpendiculaire L K que nous prolongerons d'une quantité égale à elle-même; le point L′ qui la termine est *symétrique* du point L. Mais si nous menons une ligne L′ I R en un point quelconque du miroir et une ligne L I au même point, les angles L I K et

L'IK étant égaux, les angles LIP et L'IP' le seront aussi, donc RIP opposé par le sommet à L'IP' sera égal à LIP; aussi le rayon qui tombe suivant LI doit se réfléchir suivant le prolongement de L'I. Ce qui est vrai pour ce rayon est vrai pour tous les autres, donc enfin tous les *rayons du faisceau réfléchi* RIR'I' *sont dirigés comme s'ils partaient du point* L' *qui est le point symétrique du point* L.

Supposons maintenant que l'on place l'œil quelque part en o dans le faisceau réfléchi, et que pp' représente l'ouverture de la pupille. Le petit pinceau de lumière qui tombe dans la pupille est exactement dirigé comme s'il venait du point L'; ainsi par ce pinceau l'œil voit le point lumineux en L' sans soupçonner que la lumière vient du point L et qu'elle a été brisée par la réflexion en II'.

Ce raisonnement s'appliquant à chacun des points d'un corps lumineux quelconque, il en résulte que la flamme d'une bougie, par exemple, qui est située en BG, (*Fig.* 149), doit être vue en B'G', car le sommet S est vu en S', le point B en B', le point G en G', etc. Les corps qui ne sont pas lumineux, mais simplement éclairés, présentent les mêmes phénomènes, parce que la lumière qui est irrégulièrement réfléchie sur chacun des points de leur surface se propage comme si elle était immédiatement produite par ces points.

Les images ne sont donc pas *renversées*, comme on le dit quelquefois, mais elles sont *symétriques* des objets; ce qui est très-différent.

Pour construire, en général, une image symétrique d'un corps par rapport à un plan, il faut de tous les points de ce corps abaisser des perpendiculaires sur le plan, et prolonger chacune d'une quantité égale à elle-même; l'ensemble des extrémités de ces perpendiculaires prolongées forme l'image symétrique.

S'il existait des surfaces réfléchissantes parfaitement polies, l'œil ne pourrait ni les distinguer ni même en soup-

çonner l'existence ; car les corps ne sont perceptibles à distance que par les rayons irrégulièrement réfléchis à leur surface, et tous les rayons régulièrement réfléchis font voir les points lumineux d'où ils sont sortis et non pas les réflecteurs sur lesquels ils tombent. Si le globe de la lune, par exemple, était poli comme la surface d'un globule de mercure, nous ne pourrions pas le voir en le regardant, mais nous verrions seulement l'image du soleil qui l'éclaire.

Dans le même milieu parfaitement homogène, la lumière peut se mouvoir indéfiniment sans éprouver la moindre réflexion régulière ; mais toutes les fois qu'elle se présente pour passer d'un milieu dans un autre, elle éprouve à la surface de séparation de ces milieux une réflexion régulière plus ou moins abondante.

Ce passage d'un milieu dans un autre est la seule condition nécessaire et toujours suffisante pour que la réflexion s'accomplisse. Mais il faut bien entendre qu'une même substance n'est pas essentiellement un même milieu à l'égard de la lumière ; dans une masse de verre, par exemple, il peut se trouver des couches contiguës où les molécules offrent des arrangemens différens ; alors la lumière éprouve une réflexion partielle en passant de l'une dans l'autre. Il en est de même dans les masses fluides, et un pinceau de lumière solaire éprouve un nombre infini de réflexions partielles, avant d'arriver jusqu'à nous, parce qu'il traverse successivement dans l'atmosphère un nombre infini de couches contiguës dont les densités sont différentes.

Si la direction de la lumière réfléchie est déterminée avec une précision géométrique, il n'en est pas de même de son intensité. Sur ce point difficile dont nous nous occuperons à la fin de l'optique, on sait seulement :

1° Que la quantité de lumière régulièrement réfléchie va croissant avec l'angle d'incidence, sans toutefois être nulle quand cet angle est nul ;

2° Qu'elle dépend du milieu *dans* lequel la lumière se meut et du milieu *sur* lequel elle tombe;

3° Qu'elle est très-différente pour des corps de différente nature qui sont placés dans les mêmes circonstances.

Nous citerons quelques exemples à l'appui de ces résultats généraux pour les faire mieux comprendre.

En regardant la flamme d'une bougie par réflexion sur un morceau de verre dépoli, on ne distingue pas son image quand l'angle d'incidence est très-petit, mais on la distingue assez nettement quand cet angle est très-grand. On peut même alors la distinguer sur un morceau de bois, ou d'étoffe, ou même sur un morceau de papier noirci au noir de fumée. Ces expériences prouvent en même temps que tous les corps réfléchissent régulièrement une certaine proportion de la lumière qu'ils reçoivent, et que cette proportion va croissant avec l'obliquité des rayons.

Les fragmens de verre poli sont à peine visibles quand ils sont plongés dans l'eau ou dans l'huile, et ils ne donnent alors par réflexion que des images très-obscures des objets, parce qu'au contact de ces fluides la surface du verre réfléchit moins de lumière qu'au contact de l'air.

En disposant parallèlement à côté l'une de l'autre des surfaces liquides et des substances également polies, on distingue une grande différence dans l'éclat des images qu'elles réfléchissent sous la même obliquité; le mercure et l'acier, par exemple, donnent des images bien plus éclatantes que l'eau, l'alcool ou le verre.

518. *Goniomètre de Wollaston.* Les lois de la réflexion de la lumière ont été appliquées à la mesure des angles dièdres des corps polis et particulièrement des cristaux. Les appareils dont on se sert pour cet objet se nomment des *goniomètres;* nous décrirons ici la construction du goniomètre de Wollaston comme étant l'un des plus ingénieux et des plus commodes que l'on ait imaginé.

Cet appareil est représenté dans la (*Fig.* 153); il se com-

pose d'un cercle vertical en cuivre v v′, porté sur un pied p p′ et tournant autour de son centre sur l'axe horizontal aa′. Cet axe est lui-même percé dans sa longueur pour donner passage à un axe plus petit *a a′*; le frottement qui existe entre eux est assez grand pour que le mouvement de l'un entraîne l'autre s'il n'est arrêté. L'axe *a a′* est terminé d'un côté par un bouton et de l'autre par un système de pièces qui peuvent exécuter trois mouvemens rectangulaires. Le cristal dont on veut mesurer l'angle s'ajuste avec de la cire molle sur l'extrémité *c* de la pièce *q* que l'on peut appeler la *queue* de l'appareil.

On dispose le goniomètre sur une table solide à 15 ou 20 pas d'une fenêtre ou d'un objet qui présente au moins deux lignes horizontales h et h′, la première étant un peu plus élevée que la seconde. L'axe doit être à peu près parallèle à ces lignes et le limbe très-exactement vertical. Alors on approche l'œil et l'on tourne le cristal jusqu'à ce que l'on aperçoive sur l'une de ses faces l'image de la ligne h. Ensuite on fait des essais en tournant le cristal ou les pièces qui le portent, jusqu'à ce que cette image soit horizontale; c'est une condition indispensable, et l'on parvient à la remplir exactement en regardant à la fois l'image dont il s'agit, et la ligne h′ qui n'est là que pour servir de vérification, (*Fig.* 152). Cela fait, on est assuré que cette première face du cristal est horizontale, et l'on amène la seconde face pour la soumettre à la même condition, en combinant les divers mouvemens des pièces mobiles. Enfin, l'on tourne l'axe *a a′* pour amener successivement chacune des faces du cristal devant l'œil et vérifier ainsi l'horizontalité de leur arête commune; car cette arête sera horizontale si par le seul mouvement de l'axe *a a′*, l'image de la ligne h est horizontale sur la première comme sur la seconde face. Alors, on met le zéro du limbe divisé v v′ sur le repère fixe f, on tourne de nouveau l'axe *a a′* pour faire coïncider l'image réfléchie de h avec l'image

directe de H′, et sans toucher à l'axe $a\,a'$, on fait tourner le limbe jusqu'à ce que l'image de H vienne se réfléchir sur la seconde face et de nouveau coïncider avec H′. L'arc décrit par le limbe est le supplément de l'angle dièdre du cristal.

519. *Réflexion sur deux plans parallèles.* Le point P (*Fig.* 150) se trouve entre deux miroirs parallèles M et M′, et l'œil, placé en O, aperçoit derrière le miroir M un grand nombre d'images dont on peut facilement se rendre compte. Les rayons qui tombent directement sur M forment une image en A; ceux qui tombent directement sur M′ forment une image en A′. Ces derniers rayons, après leur réflexion, sont donc comme s'ils partaient du point A′, et en venant tomber sur le miroir M ils forment une image qui se trouve en B (le point B étant symétrique (517) de A′ par rapport à M). Derrière M′ il y a pareillement une image en C (le point C étant symétrique de A par rapport à M′). Les rayons qui ont éprouvé une première réflexion sur M et une deuxième réflexion sur M′ reviennent donc de nouveau en M; ils sont comme s'ils partaient du point C, et donnent par conséquent une image en D (le point D étant symétrique de C par rapport à M), etc.

On comprend comment les réflexions successives font apercevoir un nombre indéfini d'images de plus en plus sombres et espacées suivant une certaine loi qu'il serait facile d'exprimer algébriquement.

Si l'on voulait distinguer parmi les images celles qui résultent d'une première réflexion sur M et celles qui résultent d'une première réflexion sur M′, on pourrait placer entre les miroirs un corps qui serait rouge, par exemple, du côté de M, et bleu du côté de M′; alors d'un côté toutes les images seraient alternativement rouges et bleues et de l'autre alternativement bleues et rouges.

520. *Réflexion sur deux miroirs inclinés.* Les phénomènes précédens se reproduisent entre deux miroirs inclinés, avec cette différence que le nombre des images visibles est

alors dépendant de l'angle des miroirs. Il suffira d'examiner le cas où les miroirs font entre eux un angle droit; MC (*Fig.* 151) représente la coupe du premier, et M'C celle du second; du point C de leur intersection commune on a décrit une circonférence de cercle AMM'. Un objet placé en A fait une image en B par la réflexion sur MC, et une image en B' par la réflexion sur M'C; de plus, les rayons qui ont subi une première réflexion sur MC et qui retombent sur M'C donnent une image en D (le point D étant symétrique de B par rapport à M'C), et ceux qui ont subi une première réflexion sur M'C et qui retombent sur MC donnent une image au même point D (puisque ce point est aussi le symétrique de B' par rapport à MC). Il en résulte que si l'on place l'œil à l'un des bouts des miroirs et près de leur intersection commune pour recevoir en même temps les rayons directs et ceux qui ont éprouvé une ou deux réflexions, on verra quatre images du point A, savoir l'image directe en A, puis les images réfléchies en B, B' et D.

C'est sur ce principe que l'on construit le kaléidoscope, instrument ingénieux, imaginé par M. Brewster, et qui est maintenant employé avec succès dans plusieurs arts, pour obtenir des dessins bizarrement variés et cependant toujours symétriques.

Pour avoir, par exemple, 5, 6...20 images du même point, il suffit de donner à l'angle des miroirs $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{6}$... $\frac{1}{20}$ de circonférence; mais si cet angle était, par exemple, $\frac{6}{100}$ au lieu de $\frac{1}{100}$ il est facile de voir qu'il n'y aurait plus de symétrie dans les images.

521. *Réflexion sur les miroirs courbes.* On adopte en optique ce principe fondamental, que la réflexion se fait en un point quelconque d'une surface courbe, comme elle se ferait sur le plan tangent en ce point. Nous verrons tout à l'heure que ce principe est en effet confirmé par de nombreuses expériences, mais l'on pourrait aussi le

démontrer directement par la théorie. Il en résulte que les lois générales, dont nous avons établi l'exactitude (517), s'appliquent sans restriction à toutes les surfaces, quelle que soit leur courbure, et que tout se réduit à trouver pour chaque point la direction du plan tangent ou de la normale, ce qui est simplement un problème de géométrie.

Ainsi, un point lumineux, placé au centre d'une sphère creuse et polie à l'intérieur, enverrait des rayons sur tous les points de la surface, et chacun de ces rayons serait réfléchi sur lui-même et reviendrait directement au centre après la réflexion. De même, un point lumineux placé à l'un des foyer d'un ellipsoïde enverrait des rayons sur tous les points de la surface, et tous ces rayons iraient par les réflexions se réunir et se concentrer en l'autre foyer; puis en continuant leur route, ils retourneraient au premier foyer après une seconde réflexion, reviendraient au second foyer après une troisième et ainsi de suite.

Un point lumineux placé au foyer d'un paraboloïde enverrait des rayons qui seraient tous réfléchis parallèlement à l'axe et s'en iraient se perdre à l'infini; réciproquement, un point placé à l'infini comme une étoile, et sur l'axe d'un paraboloïde, enverrait des rayons qui viendraient tous se concentrer au foyer.

C'est par des considérations analogues que l'on peut expliquer les irrégularités et les accidens singuliers que présentent les images des objets lorsqu'elles sont réfléchies par des surfaces courbes. Par exemple, l'image d'une étoile n'est qu'un point brillant lorsqu'on la regarde par réflexion sur la surface d'une eau tranquille, et elle devient une longue traînée lumineuse ou une grande tache brillante contournée de mille manières lorsqu'on la regarde par réflexion sur une surface ondulée. La ligne menée de l'œil à l'étoile peut être prise pour l'axe d'une multitude de paraboloïdes dont l'œil est le foyer, et, dans le premier cas, un seul de ces paraboloïdes pouvant être tangent à la surface

plane réfléchissante, on n'a qu'une seule image de l'étoile qui est formée par la lumière réfléchie au point de tangence; dans le second cas, un grand nombre de ces paraboloïdes peuvent être tangents en divers points de la surface courbe réfléchissante, et alors on voit autant d'images, chacune étant formée par la lumière qui se réfléchit en l'un des points de tangence.

Quand l'objet n'est pas à l'infini, il faut construire des ellipsoïdes dont l'objet et l'œil sont les deux foyers.

522. *Réflexion sur les miroirs sphériques.* Nous devons discuter en détail la réflexion de la lumière sur les surfaces sphériques, parce qu'elle est le principe de la construction de plusieurs instrumens qui sont d'un grand intérêt pour la science.

Si l'on imagine une sphère dont l'intérieur soit très-poli et qu'on la coupe par un plan, on en détache une *calotte* qui est un *miroir sphérique concave*. Ce serait un *miroir sphérique convexe* si la sphère était polie en dehors.

L'ouverture du miroir est l'angle des deux rayons C M et C M′ menés aux bords opposés de la calotte (*Fig.* 154); cet angle ne doit pas dépasser 20 ou 30°.

Le diamètre du miroir est la ligne M M′ qui joint deux bords opposés de la calotte.

L'axe du miroir est la ligne A C menée du centre de la calotte au centre de la sphère.

Le point A s'appelle aussi le *centre de figure* du miroir et le point C son *centre de courbure*.

On démontre par le calcul, et l'on peut constater aisément par une construction graphique, que tous les rayons de lumière envoyés sur le miroir, par un point quelconque L de l'axe, vont après la réflexion concourir en un même point F qui est aussi placé sur l'axe (*Fig.* 155).

Ce phénomène n'a lieu toutefois que dans les miroirs bien travaillés, dont l'ouverture ne dépasse pas 20 ou 30°.

Si l'ouverture était plus grande, les rayons qui tomberaient en B, par exemple, ne viendraient plus concourir en F; l'image ne serait plus nettement terminée, et il y aurait alors ce qu'on appelle une *aberration de sphéricité*.

Le point F se nomme *le foyer* du point L, et ces deux points considérés relativement se nomment *foyers conjugués*, parce qu'il est évident que si le point lumineux était en F il formerait son foyer en L.

Les mêmes démonstrations et les mêmes conséquences s'appliquent à un point L′ situé hors de l'axe d'une manière quelconque; seulement, il faut alors, par ce point et par le centre de courbure C, mener une ligne L′C A′ que l'on nomme *axe secondaire*, et c'est à l'égard de cet axe secondaire que les phénomènes se produisent; c'est-à-dire que les points L′ et F′ sont situés sur lui comme les points L et F l'étaient tout à l'heure sur l'axe principal.

Cependant il importe de remarquer que les points situés hors de l'axe principal sont soumis à une restriction : quand l'axe secondaire qui leur correspond fait avec l'axe principal un angle plus grand que *dix* ou *quinze degrés*, leurs images ne sont plus régulières et nettement définies, et il y a une aberration de sphéricité, comme si le miroir avait trop d'ouverture. On dit alors que ces points sont hors du *champ* du miroir.

Quand le point lumineux s'éloigne du miroir, son foyer s'en approche et *vice versâ*. Les lois suivant lesquelles ces changemens s'opèrent constituent toute la théorie des miroirs; elles sont heureusement exprimées par une formule très-simple que nous allons discuter.

Cette formule est la suivante :

$$\frac{1}{M} = \frac{2}{R} - \frac{1}{B}$$

R, rayon de courbure du miroir; ainsi cette quantité reste constante pour le même miroir.

B, distance du point lumineux ou de l'objet au miroir.

M, distance du foyer ou de l'image au miroir.

Ces distances sont toujours comptées sur l'axe principal ou sur l'axe secondaire correspondant au point lumineux. Ainsi dans la *Fig.* 155, pour le point L on aurait $B = LA$ et $M = FA$; et pour le point L′ on aurait $B = L'A'$ et $M = F'A'$.

Voici le tableau des valeurs les plus remarquables que l'on peut donner à B et des valeurs correspondantes de M.

$$1°\ldots\ B = \infty\ ;\ldots\ M = \frac{R}{2}$$

$$2°\ldots\ B = 100\ R\ ;\ldots\ M = \frac{100\ R}{199}$$

$$3°\ldots\ B = 2\ R\ ;\ldots\ M = \frac{2\ R}{3}$$

$$4°\ldots\ B = R\ ;\ldots\ M = R$$

$$5°\ldots\ B = \frac{R}{2}\ ;\ldots\ M = \infty$$

$$6\ldots\ B < \frac{R}{2}\ ;\ldots\ M = \text{valeur négative.}$$

1° Quand B a une valeur infinie, tous les rayons sont parallèles ; on a $M = \frac{R}{2}\ R$, c'est-à-dire que le foyer est alors à la moitié du rayon (*Fig.* 154). Ce foyer se nomme *foyer principal*, et sa distance au miroir *distance focale principale*.

La *Fig.* 156 représente la marche des rayons pour un faisceau parallèle et oblique à l'axe du miroir.

2° Pour $B = 100\ R$, on a $M = \frac{100\ R}{199}$ ou bien $\frac{R}{2} + \frac{R}{398}$ comme $\frac{R}{398}$ est en général une quantité très-petite, il suffit que la distance de l'objet au miroir soit égale à 100 fois le rayon, pour que l'image se fasse sensiblement au foyer principal.

3° Pour B = 2R, on a M = $\frac{2R}{3}$; ainsi, pendant que l'objet se rapproche du miroir depuis l'infini jusqu'à une distance double du rayon, l'image n'éprouve qu'un petit déplacement, puisqu'elle s'éloigne seulement depuis $\frac{R}{2}$ jusqu'à $\frac{2R}{3}$.

4° Pour B = R on a M = R, ce qui doit être, puisque tous les rayons envoyés du centre doivent revenir au centre.

5° Pour B = $\frac{R}{2}$ on a M = ∞ ; c'est-à-dire qu'en mettant le point lumineux au foyer, tous les rayons réfléchis forment alors un faisceau parallèle et ne vont se rencontrer qu'à l'infini (*Fig.* 154 et 156) ; ce qui doit être puisque l'infini et le foyer principal sont deux foyers conjugués.

6° Quand B est plus petit que $\frac{R}{2}$, c'est-à-dire quand le point lumineux est plus près du miroir que le foyer principal, M prend alors une valeur négative ; cela ne veut pas dire que les rayons réfléchis ne se rencontrent plus, mais seulement qu'ils se rencontreraient si on les prolongeait derrière le miroir (*Fig.* 157). Le foyer V se nomme alors *foyer virtuel*, parce que les rayons n'y passent pas en réalité, bien qu'ils soient dirigés comme s'ils y passaient.

Il résulte de cette discussion que si un objet BB', *Fig.* 155, était disposé sur une surface sphérique ayant le même centre C que le miroir, il formerait en MM' une image *renversée* qui en serait l'exacte représentation ; on aura une idée du rapport de grandeur qui existe entre l'image et l'objet, si l'on remarque que du centre du miroir ils seraient l'un et l'autre vus sous le même angle.

Si tous les points d'un objet n'étaient pas à la même distance du centre, tous les points de son image n'en seraient pas non plus à la même distance.

Tous ces résultats se trouvent vérifiés par les expériences suivantes :

Une large faisceau de lumière solaire tombant sur le miroir M M′ (*Fig.* 154 et 156), on voit une petite image resplendissante du soleil en F ou en F′, suivant que le faisceau incident est parallèle ou oblique à l'axe. Le soleil étant vu de la terre sous un angle d'environ 30′, son image regardée du centre C serait vue sous le même angle. Ainsi sa grandeur absolue dépend du rayon du miroir ; par exemple, au foyer du grand réflecteur d'Herschell, qui a 80 pieds de rayon, l'image du soleil a environ 3 pouces de diamètre, et elle n'a guère que 3 lignes au foyer d'un miroir de 6 pieds de rayon, et 3 millimètres au foyer d'un miroir de 1 mètre de rayon. Grande ou petite, cette image a un très-vif éclat ; dans l'espace circonscrit qu'elle occupe se trouvent concentrées à la fois toute la lumière et toute la chaleur du faisceau incident.

On peut se servir de cette expérience pour déterminer le rayon de courbure d'un miroir donné ; mais alors il faut en couvrir la surface avec un morceau d'étoffe ou de papier dans lequel on laisse seulement deux ouvertures près des bords en v et v′ (*Fig.* 158) ; car, il est bien plus facile de déterminer exactement le point de rencontre des petits faisceaux v F et v′ F, que le lieu où l'image complète du soleil a le plus petit diamètre et la plus grande netteté.

On reconnaît aisément que des objets éloignés d'environ 100 fois le rayon du miroir font leur image à très-peu près au même point que le soleil.

En promenant la flamme d'une bougie dans une chambre noire, à diverses distances devant le miroir, sur l'axe ou hors de l'axe, il est facile de vérifier tous les autres résultats du calcul que nous avons indiqués ; son image se reçoit sur un petit écran de papier ou sur un morceau de verre dépoli ; si l'écran était trop large il arrêterait une trop grande partie des rayons incidens qui arrivent au miroir.

Les *miroirs convexes* ne donnent que des *foyers virtuels* ou des *images virtuelles*.

La formule précédente devient pour ces miroirs :

$$-\frac{1}{M} = \frac{2}{R} + \frac{1}{B}$$

Les valeurs de B et de R étant essentiellement positives, les valeurs de M seront toujours négatives, et comme elles sont comptées à partir du point A, c'est une preuve que le foyer tombe toujours derrière le miroir de A vers C; ainsi le foyer n'est jamais produit par la *rencontre réelle* des rayons, mais par leur *rencontre virtuelle* ou par la rencontre de leurs prolongemens.

Pour $B = \infty$ on a $M = -\frac{R}{2}$, c'est la plus grande valeur négative de M, figure 159.

Pour $B = R$ on a $M = -\frac{R}{3}$.

Enfin pour $B = 0$ on a $M = 0$.

On peut aussi vérifier ces résultats par l'expérience en couvrant un miroir convexe avec un carton percé de deux trous et en suivant la direction des petits pinceaux réflechis pour déterminer le point où leurs prolongemens vont se couper derrière le miroir (*Fig.* 160.)

523. *Miroirs coniques et cylindriques.* Nous ne citerons ces miroirs que pour donner une idée de la marche des rayons qui sont réfléchis à leur surface et des illusions plus ou moins singulières qui en peuvent résulter.

BSB', *Fig.* 161, est la coupe d'un miroir conique dont la surface latérale extérieure est très-polie. On le pose par sa base en BMB', *Fig.* 162, au milieu d'un carton circulaire CART, sur lequel on dessine, suivant certaines lois, des figures bizarres que l'on appelle *anamorphoses*. L'œil placé en O un peu au-dessus du sommet du cône, *Fig.* 161, aperçoit par réflexion une figure régulière résultant des traits déformés qui sont tracés sur le carton, par exemple, la *Fig.* 162, fait voir l'image régulière d'une clochette.

Pour se rendre compte de cette espèce d'illusion, il suffit de remarquer que le point c, par exemple, *Fig.* 161 et 162, fera par la réflexion son image en c′, et que les points compris entre B et C feront leurs images sur la ligne B C′. Ainsi tous les points de la circonférence C A R T seront vus au seul point c′, tandis que tous les points des circonférences plus intérieures seront vus sur des circonférences de plus en plus grandes jusqu'à la circonférence B M B′ que sera vue de sa grandeur.

Les miroirs cylindriques présentent des effets analogues dont on pourra facilement se rendre compte par les premières notions de géométrie et de perspective.

524. *Des caustiques.* Quand les rayons envoyés par un seul point lumineux et réfléchis ensuite par une surface courbe continue quelconque ne se réunissent pas tous en un même foyer, il arrive toujours que les rayons voisins se rencontrent, et alors les points consécutifs où ils se coupent engendrent une surface que l'on nomme *catacaustique* ou *caustique par réflexion.* Quand la réflexion se fait sur une ligne et non pas sur une surface, la caustique est une simple ligne.

En supposant, par exemple, un point lumineux en L hors de la circonférence réfléchissante M A M′, *Fig.* 163, la caustique formée par les rayons réfléchis serait la courbe F T Q F′ Q′ T′ F′; chaque rayon réfléchi est tangent en un point de cette courbe. On comprend par là pourquoi il ne faut pas donner trop d'ouverture aux miroirs sphériques, puisque les rayons qui tombent trop obliquement à l'axe, au lieu de concourir au foyer F, s'en vont concourir en des points de plus en plus éloignés à mesure que l'obliquité augmente.

La recherche de la forme des caustiques est un problème qui a exercé la sagacité de plusieurs habiles géomètres. M. Quételet a dernièrement publié sur ce sujet deux mémoires intéressans.

CHAPITRE II.

Dioptrique ou réfraction de la lumière.

525. *Lois générales de la réfraction de la lumière.* La réfraction de la lumière est la déviation ou le changement de direction qu'elle éprouve en passant d'un milieu dans un autre. Tous les milieux dans lesquels la lumière peut se propager sont des *milieux réfringens*, parce que tous font changer de route aux rayons, à l'instant où ils entrent pour les traverser. Ainsi, l'on peut dire que le vide est lui-même un milieu refringent, car la lumière se réfracte en sortant d'un corps pour entrer dans le vide. Au passage du verre dans le vide, ou de l'air dans l'eau, ou, en général, d'un milieu dans un autre, un rayon de lumière n'éprouve pas, sans doute, une déviation brusque et instantanée, comme une ligne géométrique qui se brise; il est probable qu'il se courbe et s'incline par degrés avant d'arriver à sa nouvelle direction rectiligne; mais si cette courbure se forme réellement, son étendue est si petite qu'il n'est jamais possible d'en constater l'existence. Nous représenterons donc les rayons réfractés comme de simples lignes brisées.

L'angle d'incidence LIN (*Fig.* 164) est ici, comme pour la réflexion, l'angle du rayon incident avec la normale au point d'incidence.

L'angle de réfraction RIN′ est l'angle du rayon réfracté IR, avec le prolongement IN′ de la normale.

Le *plan d'incidence* et le *plan de réfraction* sont respectivement les plans des angles d'incidence et de réfraction. Un rayon incident ne donne naissance, en général,

qu'à un seul rayon réfracté, cependant il existe des corps tels que le spath d'Islande, le cristal de roche et plusieurs autres cristaux, dans lesquels un seul rayon incident donne presque toujours naissance à deux rayons réfractés; ces phénomènes de *double réfraction* sont liés à la *polarisation* de la lumière que nous étudierons plus tard; pour le moment nous essaierons seulement d'établir les lois de la *réfraction simple*. Ces lois sont exprimées dans les deux propositions suivantes.

1° *Le plan de réfraction coïncide toujours avec le plan d'incidence.*

2° *Le rapport des sinus d'incidence et de réfraction est constant pour les mêmes milieux.*

La première de ces propositions ne présente aucune difficulté, mais nous allons prendre un exemple pour faire mieux comprendre la seconde.

Supposons que dans un vase en verre de forme hémisphérique, *Fig.* 165, on verse de l'eau jusqu'à ce que le niveau N N′ atteigne le centre C. Un petit pinceau de lumière solaire dirigé vers le centre fera un angle d'incidence L C P que l'on mesurera sur le cercle divisé N P N′, et un angle de réfraction R C P′ que l'on mesurera de même sur le contour du vase, car il sera facile de reconnaître le point par lequel il vient sortir pour repasser dans l'air. Le sinus du premier de ces angles est la perpendiculaire L D, le sinus du second est la perpendiculaire R F, et le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction est L D divisé par R F, et l'on trouvera ce rapport sensiblement égal à 4/3; ainsi,

$$\frac{\text{L D}}{\text{R F}} = \frac{4}{3}$$

Un autre pinceau tombant dans la direction L′ C, donnerait un autre pinceau réfracté F′ C, les sinus d'incidence et de réfraction seraient alors L′ D′ et R′ F′, et l'on aurait encore

$$\frac{L'D'}{R'F'} = \frac{4}{3}$$

Il en serait de même pour tous les pinceaux, quelle que soit leur incidence. Par conséquent, il est vrai de dire que le rapport des sinus d'incidence et de réfraction est constant pour les mêmes milieux. Ce résultat s'exprime en général de la manière suivante :

$$\frac{\text{Sin. } p}{\text{Sin. } s} = n.$$

p, est l'angle d'incidence ou celui du premier milieu.
s, l'angle de réfraction ou celui du second milieu.
n, *l'indice* de la réfraction.

Dans l'exemple précédent on aurait $n = \frac{4}{3}$; mais si la surface de l'eau était en contact avec de l'hydrogène, ou avec de l'air raréfié, ou avec le vide, ou enfin avec un milieu différent de l'air ordinaire, *l'indice* toujours constant pour toutes les incidences aurait dans chaque cas une valeur plus ou moins différente de la valeur précédente. Si l'eau changeait de température, elle deviendrait réellement un autre milieu, et cette circonstance seule apporterait dans la valeur de l'indice un changement plus ou moins sensible.

L'appareil précédent est précisément celui qui fut employé autrefois par Descartes pour vérifier par l'expérience les lois de la réfraction. Car la découverte de ces lois est due au génie de ce grand géomètre ; il y avait été conduit *à priori* par des considérations théoriques que l'on regarde aujourd'hui comme de simples jeux d'imagination et qui ont cependant l'avantage d'avoir produit l'une des lois les plus belles et les plus fécondes de l'optique.

Nous indiquerons plus loin des moyens d'observation beaucoup plus précis et bien plus propres à démontrer l'exactitude mathématique de ces lois.

Quand la lumière repasse de l'eau dans l'air, l'angle

d'incidence est alors celui qu'elle fait dans l'eau, et l'angle de réfraction celui qu'elle fait dans l'air; mais tout en changeant de nom ces angles ne changent pas de valeur, le rayon qui tombe suivant RC se réfracte suivant CL, comme on peut le démontrer par l'expérience; c'est ce que l'on exprime d'une manière générale, en disant qu'*un rayon qui rebrousse chemin repasse exactement par les mêmes lieux*. Ainsi N étant l'indice de réfraction quand la lumière passe d'un premier milieu dans le second, $\frac{1}{N}$ est l'indice de réfraction quand elle repasse du second dans le premier.

Si la valeur de N est plus grande que l'unité, sin. P est plus grand qui sin. S, et P plus grand que S; ce qui prouve que la lumière, en se réfractant, se *rapproche de la normale;* on dit alors que le second milieu est *plus réfringent* que le premier. *Fig.* 166.

Si N est égal à l'unité, sin P est égal à sin S et P égal à S; c'est une preuve que la lumière ne se réfracte pas; on dit alors que le second milieu est *aussi réfringent* que le premier. *Fig.* 167.

Si N est plus petit que l'unité, sin P est plus petit que sin S et P plus petit que S; c'est une preuve que la lumière en se réfractant *s'éloigne de la normale;* on dit alors que le second milieu est *moins réfringent* que le premier. *Fig.* 168.

Ces résultats s'énoncent ordinairement en disant que la lumière se *rapproche* ou *s'éloigne* de la normale, suivant que le second milieu est *plus dense* ou *moins dense* que le premier. Cette expression n'est pas rigoureusement exacte, parce qu'il arrive quelquefois qu'un milieu *moins dense* qu'un autre est cependant *plus réfringent;* et, en général, la *réfrangibilité* est loin d'être proportionnelle à la *densité*.

La plus petite valeur de l'angle d'incidence est zéro; alors le rayon tombe suivant la normale, et comme le sinus

d'un angle nul est lui-même égal à zéro, il est nécessaire, pour que la formule générale ne soit pas absurde, que l'on ait aussi sin. s = o, ou s = o, ou, en d'autres termes, il est nécessaire que le rayon pénètre en ligne droite sans se dévier. C'est en effet ce que l'expérience confirme : jamais il n'y a de réfraction quand la lumière tombe suivant la normale au second milieu. *Fig.* 169.

La plus grande valeur de l'angle d'incidence est 90°, alors le rayon tombe parallèlement à la surface de séparation des deux milieux, *Fig.* 170; et comme le sinus de 90° est égal à l'unité, on a

$$\frac{1}{\text{Sin. } s} = N, \text{ ou } \text{Sin. } s = \frac{1}{N}$$

La valeur de s que l'on en déduit est *l'angle limite*. Pour l'air et l'eau on a $N = \frac{4}{3}$, et par conséquent $s = 48° 35'$; jamais la lumière ne peut pénétrer de l'air dans l'eau sous une plus grande obliquité.

Aussi dans un vase plein d'eau ABCD, dont une portion DC′ serait couverte, jamais un rayon de lumière directe ne pourrait pénétrer dans l'espace ADC′R, l'angle RC′P′, étant de 48° 35′. Si l'œil y était placé et dirigé vers l'espace libre CC′, il n'apercevrait rien absolument, même quand cet espace serait éclairé par la plus vive lumière; seulement si l'eau n'était pas parfaitement limpide, il y aurait quelques rayons de lumière diffuse ou irrégulièrement réfléchie qui se répandraient dans l'espace ADC′R.

Réciproquement, quand la lumière, pour sortir de l'eau dans l'air, se présente sous un angle plus grand que l'angle limite, il est impossible qu'elle sorte, et il se produit alors un phénomène remarquable que l'on appelle le *phénomène de la réflexion totale:* les rayons qui ne peuvent sortir par l'excès de leur obliquité se réfléchissent en *totalité* suivant les lois ordinaires de la réflexion (*Fig.* 171), et c'est le seul

cas où la lumière puisse se réfléchir complétement sans diminuer d'intensité.

Pour le verre ordinaire l'indice de réfraction peut varier depuis $\frac{3}{2}$ à 1,545, et par conséquent l'angle limité est compris entre 41° 49′ et 40° 20′. Il en résulte que si l'on avait un cylindre de verre (*Fig.* 172) terminé à l'une de ses extrémités par un plan perpendiculaire à l'axe et à l'autre par un plan incliné d'environ 49° et demi, on pourrait le tourner directement vers le soleil et placer impunément l'œil contre la face oblique, car on ne recevrait alors aucun rayon de lumière solaire. Le faisceau de lumière qui tombe sur A B fait alors avec la normale un angle d'environ 40° et demi et éprouve par conséquent la réflexion totale.

Après avoir indiqué la réfraction de la lumière à son entrée dans les milieux indéfinis, nous allons étudier sa refraction au travers des prismes de différentes substances.

DES PRISMES.

526. *Définitions et phénomènes généraux que présentent les rayons qui traversent des prismes.*

Un *prisme*, en optique, est un milieu diaphane ayant deux surfaces planes polies et inclinées entre elles. Concevons, pour plus de généralité, un morceau de verre, par exemple, sur lequel on ait taillé un nombre quelconque de facettes planes, le verre compris entre deux de ces faces forme un prisme; quand la lumière pénètre par l'une et sort par l'autre on dit qu'elle traverse le prisme.

Le *sommet* du prisme est la ligne suivant laquelle se rencontrent les deux facettes ou suivant laquelle elles se rencontreraient si elles étaient suffisamment prolongées.

La *base* du prisme est une face quelconque opposée au sommet, soit qu'elle existe en réalité, soit que l'on suppose seulement son existence.

L'angle réfringent est l'angle formé par les deux faces du prisme.

Une *section principale* est une section faite par un plan perpendiculairement à l'arête qui forme le sommet.

Dans la plupart des expériences nous emploierons des prismes à trois faces rectangulaires A B′, A C′ et B C′ (*Fig.* 173). Alors quand la lumière traverse les faces A B′ et B′ C, c'est l'arête B B′ qui est le sommet, et la face A C′ qui est la base; quand elle traverse A C′ et B C′ c'est C C′ qui est le sommet, et A B′ la base.

La section principale d'un tel prisme est toujours un triangle, et suivant que ce triangle est rectangle, isocèle, équilatéral ou scalène, on dit que le prisme est lui-même *rectangle, isocèle, équilatéral* ou *scalène*.

Ces prismes sont en général montés sur un pied en cuivre (*Fig.* 174). En tirant le tube T on peut les élever plus ou moins, et au moyen du *genou* G on peut leur donner toutes les positions qu'exigent les expériences. Quelquefois le genou est remplacé par deux mouvemens de rotation (*Fig.* 175), l'un autour de l'axe R, l'autre autour de l'axe R′.

Voici maintenant les phénomènes les plus généraux que présentent les prismes, soit avec la lumière ordinaire, soit avec la lumière solaire.

Premièrement. Un prisme étant horizontal, le sommet en haut (*), si l'on approche l'œil près de l'une des faces pour recevoir la lumière qui est entrée par l'autre, on observe deux phénomènes remarquables : les objets sont considérablement *déviés* et comme relevés vers le sommet du prisme; de plus, ils sont colorés vers leurs bords de toutes les couleurs de l'iris, du moins vers leurs bords horizontaux, car les bords verticaux ne prennent point

(*) On peut supposer que la base est couverte avec une bande de papier ou de carton.

de couleurs nouvelles. Si le sommet du prisme était en bas, les phénomènes seraient inverses. En plaçant le prisme *verticalement*, les phénomènes se produisent alors *horizontalement* de droite à gauche ou de gauche à droite, suivant la position du sommet du prisme. En variant ainsi les observations on peut constater que la déviation a lieu toujours vers le sommet du prisme perpendiculairement aux arêtes, et la coloration toujours parallèlement aux arêtes; c'est-à-dire que les objets ne sont colorés des nuances de l'iris que dans leurs bords qui se trouvent parallèles au prisme.

Ces phénomènes sont plus frappans et plus faciles à constater lorsqu'on regarde, par exemple, avec un prisme horizontal ou vertical les barreaux d'une croisée projetés sur le ciel, ou lorsqu'on regarde dans une chambre noire la flamme d'une bougie.

Secondement. Lorsqu'un trait de lumière solaire pénètre dans la chambre noire par une petite ouverture suivant la direction V D (*Fig.* 178), si l'on interpose près du volet un prisme horizontal dont le sommet soit en haut, on observe de même une déviation et une coloration. Le trait est rabaissé vers la base du prisme dans la direction P R, et l'image du soleil, qui était en D circulaire et blanche, paraît en R allongée perpendiculairement aux arêtes du prisme et colorée des plus vives nuances de l'iris. Elle forme ce qu'on appelle le *spectre solaire*. Quand le sommet du prisme est en bas, la déviation se fait en haut avec les mêmes apparences; si le prisme est vertical ou incliné, elle se fait alors latéralement ou obliquement, et il est facile de vérifier par l'expérience qu'elle se fait toujours perpendiculairement aux arêtes du prisme.

Dans le chapitre suivant nous ferons l'analyse du spectre solaire, et, en général, de la coloration des faisceaux qui traversent les prismes; pour le moment nous allons nous occuper de leur déviation.

527. *Direction des rayons dans les prismes et conditions de leur émergence.* Les angles d'incidence et de réfraction étant toujours dans le même plan (525), il est clair que tous les rayons qui tombent dans une section principale accomplissent leur trajet sans sortir de cette section. Par conséquent, pour suivre la marche de ces rayons il nous suffira de considérer l'angle ou le triangle qui forme la section du prisme.

Soit AS, *Fig.* 176, la première face d'un prisme de verre, et A′S la seconde; IL, un rayon incident faisant avec la normale un angle LIN; II′ et I′E le rayon réfracté et le rayon émergent qui en résultent. En passant de l'air dans le verre le rayon LI se brise et se rapproche de la normale; arrivé à la seconde face sous une certaine obliquité, il se brise de nouveau et repasse dans l'air en s'écartant de la normale; on conçoit que sa direction d'émergence I′E dépend de l'indice de réfraction de l'air par rapport au verre, de l'angle réfringent du prisme et de l'angle d'incidence sur la première face. Ces quatre quantités sont en effet liées entre elles par une formule remarquable; mais pour ne pas entrer ici dans une discussion mathématique trop compliquée, nous nous contenterons d'examiner les cas particuliers les plus importans.

Cherchons d'abord les conditions sous lesquelles l'émergence peut avoir lieu; car nous savons que la lumière qui est dans un milieu plus réfringent que l'air ne peut pas toujours en sortir pour repasser dans l'air (525), et qu'il y a pour son incidence un angle limite au-delà duquel se produit une réflexion totale.

Soit L cet angle limite, qui est pour le verre ordinaire d'environ 40° 30′, et G l'angle réfringent du prisme; nous examinerons seulement les cas où l'on a

$$G = 2L,\ G = L \text{ et } G < L.$$

1° Si l'angle réfringent du prisme est double de l'angle limite, aucun des rayons qui sont entrés par la première face

ne peut sortir par la seconde; en effet, le rayon qui est entre parallèlement à AI (*Fig.* 177), se réfracte suivant II′ en faisant avec la normale un angle I′IN′=L. Donc II′ est perpendiculaire à la ligne SM qui divise l'angle réfringent du prisme en deux parties égales, car d'après l'hypothèse MSI =L. Ainsi, en arrivant à la seconde face, le rayon II′ se présente sous l'angle limite et ne peut sortir, ou du moins il est le dernier de ceux qui peuvent sortir. Tout autre rayon incident tel que LI donnerait un rayon réfracté II″ qui serait plus oblique en arrivant à la seconde face et éprouverait nécessairement la réflexion totale.

On pourrait donc impunément fermer une chambre noire avec un prisme diaphane sans crainte qu'il entrât la moindre trace de lumière, pourvu que l'angle réfringent de ce prisme fût au moins double de l'angle limite qui convient à sa substance.

2° Si l'angle réfringent est égal à l'angle limite, tous les rayons qui tombent entre la normale et la base du prisme peuvent sortir par la seconde face.

En effet, le rayon qui entre suivant la normale NI (*Fig.* 179), passe en droite ligne et arrive à la seconde face en faisant un angle II′N′=L, car cet angle est complément de II′S qui est lui-même complément de l'angle réfringent I′SI que nous avons supposé =L, donc ce rayon est le dernier de ceux qui peuvent sortir. Tous les rayons compris entre AI et NI tomberont sous une moindre obliquité et pourront émerger; au contraire, tous ceux qui tomberont dans l'angle SIN entreront sous une obliquité plus grande et éprouveront à la seconde face une réflexion totale.

3° Quand l'angle réfringent est plus petit que l'angle limite, plusieurs des rayons qui tombent sur la première surface, entre la normale et le sommet, peuvent émerger à la seconde surface. Cela résulte évidemment de ce que nous venons de voir tout à l'heure; mais il est visible

en même temps que jamais les rayons qui tombent suivant SI ne peuvent émerger, puisqu'ils font avec la seconde surface un angle plus grand qu'avec la première dans l'intérieur du prisme, et celui-ci est déjà l'angle limite.

Pour faciliter l'application de ces principes, nous donnons dans le tableau suivant les indices de réfraction et les angles limites de plusieurs substances.

Noms des substances.	Indices de réfract.	Angles limites.
Chromate de plomb.	2,926	19° 59′
Diamant.	2,470	23 53
Soufre.	2,040	29 21
Zircon.	2,015	29 45
Grenat.	1,815	33 27
Spinelle.	1,812	33 30
Saphir.	1,768	34 26
Rubis.	1,779	34 12
Topaze	1,610	38 24
Flint	1,600	38 41
Crown	1,533	40 43
Quartz	1,548	40 15
Alun	1,457	43 21
Eau (liquide). . .	1,336	48 28
Eau (glace). . . .	1,310	49 46

Ainsi, pour chacune de ces substances, un prisme dont l'angle réfringent serait double des angles limites, ne laisserait passer aucune lumière. Par exemple, l'angle d'un triangle équilatéral étant de 60°, on voit que des prismes équilatéraux de chromate de plomb, de diamant et de soufre, ne laisseraient passer aucun des rayons qui se présent pour traverser la seconde face après avoir traversé sa première. On voit encore que des prismes rectangulaires d'eau ou de glace laissent passer la lumière au travers de leurs deux faces perpendiculaires, ce qui n'arriverait pour aucune des substances du tableau précédent, depuis

le chromate de plomb jusqu'à l'alun ; car pour elles, 90° est plus que le double de leur angle limite.

Tous ces résultats peuvent être vérifiés par l'expérience, soit avec la lumière des corps, soit avec la lumière solaire.

528. *De la déviation produite par les prismes, et particulièrement de la déviation minimum.* Quand la condition d'émergence est remplie, les rayons sortent en effet par la seconde face et sont plus ou moins déviés de leur direction primitive. L'*angle de déviation* ou *la déviation* est l'angle que l'image directe fait avec l'image réfractée, quand l'objet est supposé infiniment loin : ainsi LI étant le rayon incident, et I'E le rayon émergent (*Fig.* 180) ; si l'on place l'œil en o assez loin du prisme, on pourra recevoir en même temps un pinceau dans la direction OI' et un pinceau dans la direction OL', parallèle à LI; le premier fera voir l'objet par réfraction, le second le fera voir directement, et l'angle I'OL'=D de ces deux images est la déviation.

Pendant qu'on regarde l'image réfractée d'un objet, si l'on fait tourner le prisme sur son axe, il est facile de voir que l'objet se déplace et par conséquent que la déviation change; mais on peut remarquer aussi qu'en partant d'une position extrême pour fair tourner le prisme dans le même sens, l'image se déplace d'abord, puis s'arrête, puis se déplace de nouveau pour retourner où elle était d'abord ; lorsqu'elle s'arrête la déviation est *minimum*.

La même expérience se fait encore d'une manière plus frappante avec un trait de lumière solaire dans la chambre noire. Le spectre se déplace à mesure que l'on tourne le prisme, mais en partant pareillement d'une position extrême, pour tourner le prisme dans le même sens, on voit le spectre se rapprocher de plus en plus du lieu où se projetait l'image directe du soleil avant que le prisme fût interposé, puis elle s'arrête et s'en éloigne de nouveau à mesure que le prisme continue son mouvement. Le point où elle

s'arrête correspond évidemment à une déviation minimum.

On démontre par le calcul, et l'on peut vérifier par l'expérience, que la déviation minimum a lieu quand les angles d'incidence et d'émergence sont égaux entre eux, (*Fig.* 180), ou, ce qui revient au même, quand le rayon réfracté I I′ fait un triangle isocèle S I I′ avec les côtés du prisme, ou enfin quand l'angle de réfraction est $\frac{G}{2}$, G étant l'angle réfringent; car ce triangle étant isocèle, $\frac{G}{2}$ est complément de S I I′ qui est lui-même complément de l'angle de réfraction correspondant. Cette position est remarquable et d'une grande utilité dans beaucoup d'expériences; il en résulte qu'en désignant par D l'angle de déviation *minimum*, par P l'angle d'incidence, et par G l'angle réfringent du prisme on a

$$D = 2P - G.$$

En effet, si l'on mène par le point O les lignes O B et O B′, respectivement parallèles à S A et S A′, on a

$$D = 180 - L'OB - G - B'OE$$

et comme $B'OE = L'OB = LIA = 90 - P$

$$D = 180 - 180 + 2P - G$$

ou, $$D = 2P - G$$

et par conséquent $$P = \frac{D + G}{2}.$$

Si l'on représente par N l'indice de réfraction de la substance on a en général

$$\frac{\text{Sin. } P}{\text{Sin. } S} = N$$

et puisque dans la position dont il s'agit on a

$$P = \frac{D + G}{2} \text{ et } S = \frac{G}{2}$$

il en résulte

$$\frac{\text{Sin.}\left(\frac{D+G}{2}\right)}{\text{Sin.}\frac{G}{2}} = N$$

formule importante qui permet de trouver le rapport de réfraction N par la seule observation de la déviation *minimum* D, car il est toujours facile de déterminer l'angle réfringent G; voici la disposition générale des expériences.

529. *Recherche des indices de réfraction des solides et des liquides transparens.*

1° Pour les *corps solides*, on en fait d'abord un prisme dont on mesure l'angle réfringent G avec le goniomètre de Wollaston ou par d'autres moyens. Ce prisme étant disposé verticalement sur un alidade mobile en un lieu d'où l'on puisse apercevoir une mire très-éloignée, on ajuste à quelques pas de distance un cercle répétiteur de manière que le limbe soit horizontal et à la hauteur du prisme et de la mire. L'une des lunettes est dirigée sur un point de la mire et ensuite fixée, avec l'autre on cherche à recevoir l'image réfractée du même point de la mire, ce qui sera toujours facile si le prisme est bien vertical. Dès que cette image vient tomber sous le fil de la lunette on fait tourner en même temps le prisme au moyen de l'alidade horizontale, et la lunette pour suivre l'image. Après quelques essais on trouve la position de la déviation *minimum* dont la mesure est donnée par l'angle des lunettes. Cette valeur et la valeur connue de $\frac{G}{2}$ étant substituées dans la formule précédente, il n'y a plus d'inconnue que la valeur de N que l'on détermine aisément.

2° Pour *les liquides* on suit exactement le même procédé; mais on leur donne la forme de prisme de la manière suivante : on perce un trou de part en part dans un prisme

de verre (*Fig.* 183), et un trou plus petit v dans sa base. Le premier se ferme en appliquant sur chaque face du prisme une petite plaque de verre à faces bien parallèles, ensuite on le remplit de liquide et l'on met en v un bouchon B à l'émeri. On a coutume de faire sur la longueur d'un prisme solide cinq ou six prismes liquides (*Fig.* 184).

3°. Nous exposerons plus tard (microscope) un troisième procédé imaginé par M. Brewster pour déterminer les indices de réfraction des liquides et ceux des corps mous, comme la cire, le caoutchouc, etc., etc., qui deviennent suffisamment transparens lorsqu'ils sont réduits en lames très-minces. Ce procédé simple et très-ingénieux offre surtout les avantages suivans : 1° il s'applique à une petite goutte de liquide ou à une parcelle de corps solide ; 2° il réduit toutes les mesures à la détermination de trois distances rectilignes très-faciles à estimer avec exactitude.

Le tableau suivant contient les résultats des principales expériences qui ont été faites sur les solides, les liquides et les corps mous pour déterminer leurs indices de réfractions. Il est extrait de l'Encyclopédie de M. Brewster, et les nombres qui ne portent pas de nom ont été déterminés par cet habile observateur ; M. Brewster fait remarquer toutefois que pour plusieurs substances il n'a eu à sa disposition que des échantillons très-imparfaits.

Tableau des indices de réfraction.

NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES de réfraction.	NOMS des observateurs.
Chromate de plomb, *maximum*..	2,974	
id. id. autre espèce.	2,926	
Argent rouge.	2,564	
Réalgar artificiel.	2,549	
Chromate de plomb, *minimum*.	2,500	
Anatase.	2,500	
Diamant.	2,755	Rochon.
id.	2,487	
id.	2,470	
id.	2,439	Newton.
Sulfure de zinc.	2,260	
Phosphore.	2,224	
Verre d'antimoine.	2,216	
id. id.	1,980	Wollaston.
Soufre fondu.	2,148	
id. natif.	2,115	
id. id.	2,040	Wollaston.
id. id.	1,958	Haüy.
Oxide lamellaire de fer.	2,100	Young.
Verre, 3 de plomb et 1 de flint.	2,028	Zeiher.
Tungstate de chaux, *maximum*.	2,129	
id. id. *minimum*.	1,970	
Carbonate de plomb, *maximum*.	2,084	
id. id. *minimum*.	1,813	
Protochlorure de mercure. . . .	1,970	
Zircon, *maximum*	2,015	
id. *minimum*.	1,961	
id.	1,950	Wollaston.
Verre, 2 de plomb, 1 de sable .	1,987	id.
Sulfate de plomb.	1,925	
Verre d'antimoine.	1,889	Newton.
Verre, 2 de plomb, 1 de flint. .	1,830	Zeiher.
Grenat.	1,815	
Spinelle rouge.	1,812	Wollaston.
Arsenic.	1,811	id.
Saphir bleu. . , ...	1,794	
id. blanc.	1,768	Wollaston.

NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES de réfraction.	NOMS des observateurs.
Pyrope.	1,792	
Nitrate d'argent, *maximum*. . .	1,788	
id. id. *minimum*. . .	1,729	
Verre, 1 de plomb, 1 de flint. .	1,787	Zeiher.
Rubis.	1,779	
Feldspath.	1,764	
Chrysobéril.	1,760	
Nitrate de plomb.	1,758	
Verre, 3 de plomb, 4 de flint. .	1,732	
id. 1 de plomb, 2 de flint. .	1,724	
Axinite.	1,735	
Verre coloré en rouge foncé. . .	1,729	
Verre coloré en rouge par l'or. .	1,715	
Épidote, *maximum*.	1,703	
id. *minimum*.	1,661	
Carbonate de strontiane, *maximum*.	1,700	
id. id. *minimum*.	1,543	
Boracite.	1,701	
Verre coloré en orangé.	1,695	
Sulfure de carbon	1,678	
Chrysolite, *maximum*.	1,685	
id. *minimum*.	1,660	
Aragonite, *ref. ordinaire* . . .	1,6931	Malus.
id. *ref. extraordinaire*. .	1,5348	id.
Spath calcaire, *ref. ordinaire*. .	1,6543	id.
id. id. *ref. extraord*. .	1,4833	id.
Sulfate de baryte.	1,6468	id.
id. id. *ref. extraord*.	1,6352	id.
id. id. *ref. ordinaire*.	1,6201	Biot.
Topaze incolore.	1,6102	id.
id. du Brésil, *ref. extraord*.	1,6401	id.
id. id. *ref. ordinaire*	1,6325	id.
Antydrite, *ref. extraordinaire* . .	1,6219	id.
id. *ref. ordinaire*	1,5772	id.
Euclase, *extraordinaire*.	1,663	id.
id. *ordinaire*.	1,6429	id.
Perle.	1,653	
Verre rouge, hyacinthe	1,647	
Huile de cassia.	1,641	
Verre opale.	1,635	

NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES de réfraction.	NOMS des observateurs.
Baume de tolu.	1,628	
Castor?	1,626	
Hydrochlorate d'ammoniaque. .	1,625	
Gayac.	1,619	
Flint-glass	1,616	
id. autre espèce.	1,604	
Meïonite.	1,606	
Flint glass.	1,60512	Malus.
id.	1,576	
Autre espèce.	1,596	
Flint-glass, différentes espèces. .	1,625 1,604 1,594 1,593 1,590	Boscowich
Huile d'amandes amères.	1,603	
Verre vert.	1,615	
id. pourpre.	1,608	
Huile d'anis.	1,601	
Baume du Pérou.	1,597	
Gomme ammoniaque.	1,592	
Écaille de tortue.	1,591	
Poix.	1,586	
Baume styrax.	1,584	
Verre de bouteilles.	1,582	
Acide tartarique.	1,575	
id. id.	1,518	
Verre rose	1,570	
Corne.	1,565	
Quartz, *ref. extraordinaire*. . .	1,558	Malus.
id. *ref. ordinaire*.	1,548	id.
Mellite.	1,556	
id.	1,538	
Gomme mastic.	1,560	
Poix de Bourgogne.	1,560	
Résine.	1,559	
Térébenthine.	1,557	
Sel gemme.	1,557	
Sucre fondu	1,554	
Encens.	1,554	

NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES de réfraction.	NOMS des observateurs.
Comptonite	1,553	
Calcédoine	1,553	
Sulfate de cuivre, *maximum*	1,552	
id. id. *minimum*	1,531	
Copal	1,549	
Baume du Canada	1,549	
Résine élémi	1,547	
Huile de tabac	1,547	
Verre en feuille	1,542	Boscowich.
id. id.	1,538	id.
id. id.	1,529	id.
id. id.	1,526	id.
id. id.	1,514	id.
Vieux verre en feuille	1,545	
Dichroïte	1,544	
Glace de Saint-Gobin	1,543	Wollaston.
Colophane	1,543	id.
Cire	1,542	id.
Gomme oliban	1,544	
Acide phosphorique solide	1,544	
Carbonate de baryte, *minimum*	1,540	
Crownglass	1,534	
Caoutchouc	1,534	
id.	1,524	Wollaston.
Crown glass	1,533	id.
Verre de borax	1,532	
Verre de phosphore	1,532	
Huile de sassafras	1,532	
id. id.	1,536	Wollaston.
id. id.	1,544	Euler.
Huile de girofle	1,535	Wollaston.
Cristallin de poisson, au centre	1,530	id.
Cristallin de bœuf desséché	1,530	id.
Verre ?	1,580	
Baume de copahu	1,528	
Leucite	1,527	
Verre en feuille	1,527	
Acide citrique	1,527	
Laque en écaille	1,525	
Crown-glass	1,525	Wollaston.

NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES de réfraction.	NOMS des substances.
Sulfate de chaux.	1,525	Wollaston.
Verre de borax, 1 de borax et 2 de silice.	1,522	
Gomme adragante.	1,520	
Mésotype, *maximum*.	1,522	
id. *minimum*.	1,516	
Nitre, *maximum*.	1,514	
id. *minimum*.	1,335	
id.	1,524	Newton.
Tartrate de potasse et de soude. .	1,515	
Verre en feuille d'Hollande. . .	1,517	
Sulfate de zinc, *ref. ordinaire*. .	1,517	
Madelstein.	1.515	
Cire, 17°,5 cent.	1,512	Malus.
id. fondante.	1,450	id.
id. au point d'ébullition. . . .	1,442	id.
Gomme arabique.	1,512	
Sulfate de potasse.	1,509	
id. id.	1,495	Wollaston.
Huile de cumin.	1,508	
Stilbite.	1,508	
Huile de noix.	1,507	
id. de piment.	1,507	
id. de fenouil, ...	1,506	
id. d'ambre.	1,505	Wollaston.
id. de bois de Rhodes. . . .	1,500	
id. de faîne.	1,500	
id. de muscade.	1,497	Wollaston.
Baume de soufre.	1,497	
Sulfate de fer, *maximum*. . . .	1,494	
Huile d'angélique.	1,493	
id. de marjolaine.	1,491	
id. de carvi.	1,491	
id. de ricin.	1,490	
Obsidienne.	1,488	
Suif froid.	1,490	Wollaston.
Sulfate de magnésie.	1,488	
id. id.	1,465	
Huile d'hysope.	1,487	
Camphre.	1,487	

NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES de réfraction.	NOMS des observateurs.
Huile de fenugrec	1,487	
id. de Cajeput,	1,483	
id. d'amandes	1,483	
id. de sabine	1,482	
id. de pouillot	1,482	
Sulfate d'ammoniaq. et de magné.	1,483	
Carbonate de potasse	1,482	
Huile de limon	1,479?	
id. de menthe sauvage	1,481	
Beurre froid	1,480	Wollaston.
Opole en partie hydrophane	1.479	
Huile de thym	1,477	
id. d'aneth	1,477	
Essence de limon	1,476	Wollaston.
Huile de térébenthine	1,475	
id. commune	1,476	Wollaston.
id. rectifiée	1,470	id.
id. de raves	1,475	
Borax	1,475	
Huile de genièvre	1,473	
Huile de hêtre	1,471	
Huile de bergamotte	1,471	
Huile d'olive	1,470	
Spermaceti	1,470	
Huile de romarin	1,469	
id. d'olive	1,467	Newton.
id. id.	1,469	Wollaston.
id. de lavande	1,467	id.
Suif fondu	1,464	id.
Huile de pavots	1,463	
id. de lavande	1,457	
Alun	1,457	Wollaston.
Huile de camomille	1,457	
id. d'absinthe	1,453	
Cristallin de bœuf	1,463	Euler.
id. id.	1,447	Wollaston.
Spermaceti fondu	1,446	id.
Acide hydrophosphorique	1,442	
id. sulfurique	1,440	
id. id.	1,435	Wollaston.

NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES de réfraction.	NOMS des observateurs.
Acide sulfurique.	1,428	Newton.
Spath fluor.	1,436	
id. id.	1,433	Wollaston.
Huile de rhue.	1,433	
Acide phosphorique liquide. . . .	1,426	
id. nitrique, densité 1,48. . .	1,410	Wollaston.
id. hydrochlorique très-concentré.	1,410	Biot.
id. id. concentré.	1,401	
id. nitrique.	1,406	
id. nitreux.	1,396	
id. acétique.	1,396	
id. malique.	1,395	
Alcool.	1,374	
id.	1,370	Wollaston.
Huile d'ambre gris	1,368	
Blanc d'œufs.	1,361	
id. id.	1,351	Euler.
Albumine.	1,360	Wollaston.
Éther.	1,358	id.
Colle de poisson	1,345	
Cryolite.	1,349	
Vinaigre distillé.	1,344	Euler.
Eau salée.	1,343	
Humeur aqueuse de l'œil. . . .	1,337	
Humeur vitrée.	1,339	
Enveloppe extérieure du cristalin	1,377	
Enveloppe moyenne.	1,379	
id. centrale.	1,399	
Cristallin entier.	1,384	
Eau.	1,336	
Glace.	1,310	Wollaston.
id.	1,307	
Tabashir.	1,111	
Air.	1,000276	Bradley.
Vide.	1,000000	

530. *Du changement de valeur de l'indice de réfraction d'une substance quand le milieu qui l'environne change de*

nature, et de la vitesse de la lumière dans les différens milieux.

Dans le tableau précédent, les indices de réfraction sont déterminés en supposant que la lumière passe immédiatement du vide dans chacune des substances; mais si la lumière passait, par exemple, de l'eau dans le verre, il est évident que l'indice de réfraction du verre par rapport à l'eau ne pourrait pas être le même que l'indice de réfraction du verre par rapport au vide, bien qu'il soit constant dans un cas comme dans l'autre. Les recherches sur ce sujet ont conduit à un résultat général qui peut être énoncé de la manière suivante : N et N′ *étant les indices de réfraction de deux susbstances par rapport au vide, l'indice de la seconde, par rapport à la première, est* $\frac{N'}{N}$.

Ainsi, l'indice de l'eau par rapport au vide étant 1,336, et celui du verre ordinaire étant 1,525, l'indice du verre par rapport à l'eau est 1,525 divisé par 1,336 ou 1,141; celui de l'eau par rapport au verre serait 1,336 divisé par 1,525 ou 0,876.

On peut démontrer cette vérité fondamentale par des expériences semblables à celles qui servent à déterminer, en général, les indices de réfraction; pour cela, il suffit d'accoler deux prismes de diverses substances, soit en opposant leurs angles, soit en les tournant dans le même sens, *Fig.* 181, et d'observer la déviation que ce système imprime à la lumière. Les angles d'incidence et d'émergence étant connus, ainsi que les angles réfringens des prismes et leurs indices de réfraction par rapport au vide, il sera facile de trouver par le calcul les angles IMN, et I′MN′ du rayon avec la surface commune, et de vérifier si leurs sinus sont entre eux comme les indices N et N′. On peut aussi employer deux lames parallèles superposées, *Fig.* 188; alors on reconnaît par l'expérience que le rayon incident LI, et le rayon émergent I′E, sont toujours pa-

rallèles. Or, N et N′, étant les indices de réfraction de la première et de la seconde substance par rapport au vide, on a :

$$\frac{\text{Sin. P}}{\text{Sin. S}} = \text{N} \text{ et } \frac{\text{Sin. P}'}{\text{Sin. S}'} = \frac{1}{\text{N}'}$$

P est l'angle LIN,

S.... l'angle MIN′ = IMP,

P′.... l'angle MI′Q = I′MP′.

S′.... l'angle EI′Q′.

Et puisque P = S′, on en déduit :

$$\frac{\text{Sin. P}'}{\text{Sin. S}} = \frac{\text{N}}{\text{N}'} \text{ ou } \frac{\text{Sin. I}'\text{MP}'}{\text{Sin. IMP}} = \frac{\text{N}}{\text{N}'}.$$

Donc, en passant du premier milieu dans le second, la lumière fait des angles tels que le rapport de leurs sinus est constant et égal au rapport des indices de ces milieux, relativement au vide.

Il en résulte évidemment, qu'un rayon de lumière qui traverse un nombre quelconque de milieux à faces parallèles, se trouve réfracté par le dernier de ces milieux, comme il l'aurait été s'il y fût entré immédiatement sous la même incidence. Ainsi, dans la *Fig.* 186, si un rayon tombait immédiatement sur le second milieu, en M, parallèlement à LI, il se réfracterait suivant MI′ et émergerait comme il fait suivant I′E.

Nous démontrerons plus tard que la vitesse de propagation de la lumière est différente dans les différens milieux, et que le rapport de ses vitesses dans deux milieux quelconques, est précisément le rapport inverse des indices de réfraction de ces milieux; par conséquent, la plus grande vitesse a lieu dans le vide, et la moindre dans le chromate de plomb, qui est le milieu le plus réfringent. Celle-ci est à peu près un tiers de la première, puisque l'indice du chromate de plomb est presque égal à 3. En rapprochant ce résultat du précédent, on voit que, dans le même mi-

lieu, la lumière a toujours la même vitesse, quelle que soit la route qu'elle suive pour y arriver et les réfractions qu'elle éprouve dans son trajet. Ainsi, par exemple, c'est toujours avec la même vitesse qu'elle traverse les humeurs de l'œil et qu'elle vient frapper la rétine, soit qu'elle y pénètre en sortant de l'eau, de l'huile, du vide, de l'air ou de tout autre milieu; aussi ce qui nous paraît rouge ou bleu dans l'air, nous paraît rouge ou bleu dans l'eau. Mais si l'humeur de l'œil était un peu altérée dans sa nature, de manière que son indice de réfraction fût changé, à l'instant la vitesse de la lumière changerait en sens contraire, et il est bien probable, comme nous le verrons, que toutes les couleurs changeraient alors de nuance et de ton.

531. *Recherche du rapport de réfraction des corps opaques.* Le phénomène de la réflexion totale dont nous avons parlé (525) a conduit Wollaston à un procédé ingénieux pour déterminer l'indice de réfraction de certains corps opaques, et par suite leur puissance réfractive et leur pouvoir réfringent.

Concevons un prisme rectangulaire diaphane ABD, dont l'une des faces AD soit horizontale, et imaginons qu'une goutte de liquide G soit immédiatement appliquée contre cette face, N est l'indice de réfraction du prisme et N′ celui du liquide; VV′ est une règle verticale sur laquelle on fait glisser un *voyant* ou une plaque percée d'un petit trou pour regarder dans la direction OE et dans d'autres directions plus ou moins obliques. Si le prisme est de crownglass, dont l'indice soit de 1,535, l'angle limite sera 40° 39′, et par conséquent le rayon qui aurait pénétré parallèlement à AD, viendrait tomber sur BD, en faisant un angle de 90°—40°.. 39′=49° 21′, et ne pourrait sortir. Ainsi, en regardant par la face BD, on ne verra aucun des objets qui sont au-delà de la face AD; seulement par réflexion totale sur cette face, on pourra distinguer les objets qui sont au-devant de AB. C'est en effet ce que l'expérience confirme, sur tous les

points de AD qui ne sont pas recouverts de liquide, mais là où le liquide touche le verre il se produit un autre phénomène. La lumière qui vient dans diverses directions, telle que L'I, passe dans la goutte, sans éprouver de réflexion totale, et l'œil, placé dans la direction O'E', aperçoit en G une tache noire comme si le *miroir* AD était percé d'un trou. Cependant à mesure que l'œil s'abaisse vers O, pour regarder par des rayons plus obliques, la goutte paraît moins noire, et enfin, *si le liquide est moins réfringent que le prisme*, il arrive qu'à une certaine obliquité telle que OE, par exemple, la goutte disparaît subitement, et la face AD fait partout l'effet d'un miroir parfait. C'est en mesurant cette obliquité de disparition, ou l'angle EOV, que l'on peut déterminer l'indice N' du liquide qui mouille le prisme en G; en effet, cet angle étant connu, on en déduit son complément OEP = P. En substituant sa valeur et celle de N dans la relation,

$$\frac{\text{Sin. P}}{\text{Sin. S}} = \text{N}.$$

On en déduit l'angle S = P' EI, et par suite son complément EIQ = QIL. Or, puisque c'est sous cette obliquité que la goutte commence à disparaître, il est clair que le rayon LI est le rayon limite, c'est-à-dire celui qui, en passant dans le liquide, donne un rayon émergent parallèle à AD; on a donc :

$$\frac{\text{Sin. } 90^\circ}{\text{Sin. LIQ}} = \frac{\text{N}}{\text{N}'} \quad \text{d'où} \quad \text{N}' = \text{N Sin. LIQ}.$$

On peut donner une autre forme à cette valeur inconnue de N' en l'exprimant directement au moyen de l'angle observé EOV, que nous désignerons par B. On aurait alors :

$$\text{N}'^2 = \text{N}^2 - \text{Cos.}^2\text{B}.$$

Cette formule est celle qui convient aux corps diaphanes

que l'on met en contact avec le prisme. Mais quand ces corps sont opaques, on se sert de cette autre formule,

$$N'^2 = N^2 - 2\cos^2 B.$$

Les raisonnemens que nous avons faits pour démontrer la première ne s'appliquent nullement à la seconde, et s'il est nécessaire de l'adopter pour les corps opaques comme la théorie de l'émission l'indique, il est nécessaire aussi de trouver dans la théorie des ondulations des raisonnemens qui la justifient; car ceux que je pourrais donner ici me semblent insuffisans.

532. *De la puissance réfractive et du pouvoir réfringent.* On est convenu d'appeler *puissance réfractive* d'une substance, le carré de son indice de réfraction diminué de l'unité, ou N^2-1. Cette définition n'est pas purement arbitraire comme elle le paraît d'abord : la quantité N^2-1 a reçu un nom particulier, parce qu'elle a une liaison simple et remarquable avec la cause de la réfraction dans le système de l'émission; elle est l'accroissement du carré de la vitesse que prend la lumière en passant du vide dans les diverses substances; car, dans ce système, on est inévitablement conduit à supposer que la lumière augmente de vitesse en passant dans les milieux plus réfringens. Dans le système des ondulations, cette même quantité dépend des divers degrés de condensation de l'éther.

La puissance réfractive peut être évaluée d'une manière absolue ou d'une manière relative, par exemple, 1,326 et 0,785 sont les puissances réfractives absolues du verre et de l'eau, ou les valeurs de N^2-1 correspondantes à ces substances; mais en divisant le premier de ces nombres par le second, l'on aurait 1,690 qui serait la puissance réfractive du verre par rapport à celle de l'eau.

Le *pouvoir réfringent* d'une substance est le quotient de sa puissance réfractive par sa densité. Ainsi le pouvoir réfringent du verre ordinaire est 0,533, et celui de l'eau

0,785. Et si l'on voulait évaluer le premier par rapport au second, c'est-à-dire, en prenant le second pour unité, il faudrait diviser 0,533 par 0,785, ce qui donnerait 0,679 pour le pouvoir réfringent du verre rapporté à l'eau. Nous avons tiré de l'Encyclopédie de Brewster les résultats suivans :

Tableau des pouvoirs réfringens de quelques corps solides et liquides.

Nuance de substance.	Pouvoirs réfringens absolus.	
Tabashir	0,098	
Cryolite	0,274	
Spathfluor	0,343	
Sulfate de baryte	0,383	
Quartz	0,541	Malus.
Acide sulfurique	0,612	Newton.
Spath calcaire	0,642	Malus.
Cristal de roche	0,654	
Acide nitrique	0,668	
Flint-glass, *minimum*	0,734	
Rubis	0,739	
Topaze du Brésil	0,759	
Eau	0,785	
Flint-glass, *maximum*	0,874	
Alcool	1,012	
Carbonate de potasse	1,023	
Chromate de plomb	1,044	
Hydrochlorate d'ammoniaque	1,129	
Nitrate de potasse	1,196	
Hydrochlorate de soude	1,209	
Camphre	1,255	Newton.
Huile d'olive	1,261	Newton.
Huile de lin	1,282	Newton.
Cire	1,331	Malus.
Essence de térébenthine	1,322	Newton.
Ambre	1,365	Newton.
Octohédrite	1,382	
Diamant	1,396	Malus.

Diamant	1,456 Newton.
Réalgar	1,667
Ambre gris	1,700
Soufre	2,200
Phosphore	2,886

Newton, qui ne connaissait ni le pouvoir réfringent du soufre ni celui du phosphore, avait remarqué que les substances combustibles, comme les huiles et les résines, avaient en général des pouvoirs réfringens considérables, et il n'avait pas hésité à conclure que l'eau et le diamant devaient aussi, à cause de leur grande réfringence, renfermer un principe combustible; cette conjecture hardie a été depuis pleinement vérifiée par l'expérience, car nous savons maintenant que le diamant n'est que du charbon, et nous verrons (533) que l'hydrogène est en même temps le plus réfringent et le plus combustible des corps; de plus, le soufre et le phosphore viennent encore généraliser cette remarque.

Quand une substance se dilate ou se condense soit par une action mécanique, soit par la chaleur, son indice de réfraction change ainsi que sa densité; mais il paraît que son pouvoir réfringent reste sensiblement constant, sous la seule condition que cette substance ne passe pas à l'état gazeux, car nous verrons bientôt que dans ce cas le pouvoir réfringent éprouve une diminution sensible.

333. *Recherche de l'indice de réfraction des gaz, de leur puissance réfractive et de leur pouvoir réfringent.* Pour déterminer l'indice de réfraction de l'air on pourrait faire passer la lumière du vide dans un prisme d'air d'un angle connu; mais l'expérience inverse offre plus de facilités : on fait passer le rayon au travers d'un prisme vide environné d'air; et l'indice de réfraction se détermine encore comme dans les solides et liquides, c'est-à-dire, par la connaissance de l'angle réfringent du prisme, de l'inci-

dence de la lumière sur sa première face, de l'émergence à la seconde et de la déviation, en ajoutant à ces données la température et la pression de l'air environnant. L'indice de réfraction de l'air une fois trouvé, on arrive par des expériences analogues à l'indice des différens gaz pour des températures et des pressions connues. Cette question délicate et importante a été traitée par MM. Arago et Biot en 1805, et par M. Dulong en 1825. Nous essayerons seulement de donner ici une analyse des procédés qui ont été employés par ces habiles physiciens, et des résultats auxquels ils sont parvenus.

MM. Arago et Biot employaient un *prisme à gaz* qui est représenté vu par en haut dans la *Fig.* 188 et vu de face dans la *Fig.* 189. Il se compose d'un tube de verre TT′ de 20 à 30 centimètres de longueur sur 4 à 5 centimètres de diamètre, dont les deux extrémités sont d'abord coupées en sifflet, suivant les directions TF et T′F′, et ensuite recouvertes et fermées hermétiquement par des lames de verre à faces parallèles. L'angle que ces lames forment entre elles est l'angle du prisme, il doit être très-grand à cause de la faible refringence du gaz; dans l'appareil de MM. Arago et Biot, il était de 143° 7′ 28″. Au milieu de la longueur du tube, et parallèlement aux faces du prisme, on pratique deux ouvertures opposées v et v′, *Fig.* 189, pour introduire ou enlever à volonté au moyen d'une machine pneumatique le gaz que l'on veut soumettre à l'expérience. Les petits tubes qui sont scellés dans ces ouvertures sont munis de robinets convenables, et communiquent à un baromètre qui donne à chaque instant la pression du gaz intérieur.

Supposons que le prisme soit vide, que son arête soit verticale, et qu'il ait été disposé pour l'expérience en un lieu d'où l'on puisse apercevoir une mire très-éloignée, *Fig.* 187; l'observateur, placé en o, verra une image directe oL de cette mire, et une image réfractée oE; l'angle LoE

sera la déviation; cet angle devra être observé avec une grande exactitude, car il s'élevera seulement à 5 ou 6 minutes; avec cette donnée et l'angle réfringent du prisme on pourra trouver l'indice de réfraction par la formule précédente (528 et 529), si l'on a choisi la position du minimum. Seulement il faudra faire les corrections nécessaires, soit à cause de l'air qui reste dans le prisme, soit à cause du défaut de parallélisme des lames qui en forment les faces.

Par des expériences précises et souvent répétées, MM. Arago et Biot ont établi, qu'à la température de 0, et sous la pression de $0,^{m}76$, l'indice de réfraction de l'air, par rapport au vide absolu, est de 1,000294, et sa puissance réfractive est par conséquent 0,000588. Ce résultat se trouve parfaitement conforme à celui que Delambre avait déduit des réfractions astronomiques.

L'indice de réfraction de l'air une fois connu, on fait passer dans le prisme les gaz que l'on veut soumettre à l'expérience, et après avoir observé la déviation qu'ils produisent, il reste à faire les calculs convenables pour en déduire soit les indices de réfraction, soit les puissances réfractives. MM. Arago et Biot ont soumis à l'expérience, l'air, l'oxigène, l'hydrogène, l'azote, l'ammoniaque, l'acide carbonique et l'acide hydrochlorique; et ils ont établi ce principe fondamendal : que *les puissances réfractives d'un gaz sont proportionnelles à sa densité*, ou, ce qui revient au même, que *le pouvoir réfringent d'un gaz est constant à toute température et à toute pression*. Ce principe est encore vrai, quand les gaz se *mélangent* d'une manière quelconque, c'est-à-dire que la puissance réfractive d'un mélange est égale à la somme des puissances réfractives de ses élémens. Mais nous allons voir, d'après les recherches de M. Dulong, que toutes les fois que les gaz se *combinent*, la puissance réfractive du produit cesse d'être égale à la somme des puissances réfractives des composans.

M. Dulong s'est principalement proposé de comparer entre elles les puissances réfractives des gaz à la même température et sous la même pression, et l'artifice ingénieux qu'il a employé pour y parvenir lui a permis de donner à ses résultats un degré d'exactitude véritablement inespéré dans des recherches aussi délicates. Cet artifice consiste à donner aux différens gaz une densité telle qu'ils impriment tous exactement la même déviation à la lumière; pour cela un prisme analogue au précédent, ayant un angle de 145° environ, communique à un réservoir dans lequel on peut, d'une part, faire le vide au moyen de la machine pneumatique, et de l'autre introduire un gaz quelconque en variant à volonté les pressions. L'on fait, par exemple, une première expérience en introduisant dans le prisme de l'air sec sous la pression ordinaire et à une température connue; avec une bonne lunette placée à quelque distance, on regarde l'image d'une mire éloignée réfractée au travers du prisme; cela fait, on fixe la lunette dans cette position, on vide le prisme bien complétement, sans le déranger, et l'on y introduit un autre gaz, de l'acide carbonique, par exemple, en variant la pression jusqu'à l'instant où l'image réfractée de la mire vient tomber de nouveau sous le fil de la lunette; la température étant restée la même, supposons que la pression de l'acide carbonique dans le prisme soit alors de 0,498. Sous cette pression, l'acide carbonique déviant la lumière autant que l'air à 0,76, il est évident qu'il a le même indice de réfraction et la même puissance réfractive, et puisque les puissances réfractives sont proportionnelles aux densités, on aura :

$$1 : x :: 0,498 : 0,76;$$

d'où $x = 1,526$, qui sera la puissance réfractive de l'acide carbonique sous la pression de 0,76 et à la même température que l'air.

Par des expériences analogues sur tous les gaz simples ou composés on obtiendra, comme on le voit, leurs puissances réfractives relativement à l'air au moyen d'une simple proportion.

Les résultats de M. Dulong sont contenus dans le tableau suivant :

Puissances réfractives des gaz rapportées à celle de l'air à force élastique égale.

Noms des gaz.	Puissances réfractives.	Densités.
Air atmosphérique.	1, ...	1
Oxigène.	0,924. . . .	1,1026
Hydrogène.	0,470. . . .	0,0685
Azote.	1,020. . . .	0.976
Chlore.	2,623. . . .	2,47
Oxide d'azote.	1,710. . . .	1,527
Gaz nitreux.	1,03	1,039
Acide hydrochlorique.. . .	1,527. . . .	1,254
Oxide de carbone.	1,157. . . .	0,972
Acide carbonique.	1,526. . . .	1,524
Cyanogène.	2,832. . . .	1,818
Gaz oléfiant. . . , ...	2,302. . . .	0,980
Gaz des marais..	1,504. . . .	0,559
Éther muriatique.	3,72	2,234
Acide hydrocyanique.. . .	1,531. . . .	0,944
Ammoniaque.	1,309. . . .	0,591
Gaz oxi-chloro-carbonique	3,936. . . .	3,442
Hydrogène sulfuré.	2,187. . . .	1,178
Acide sulfureux.	2,260. . . .	2,247
Éther sulfurique.	5,197. . . .	2,580
Soufre carburé.	5,110. . . .	2,644
Hydrogène phosph. *minim.*	2,682. . . .	1,256

Pour passer maintenant des puissances réfractives relatives aux puissances réfractives absolues, il faut avoir recours à la donnée fondamentale qui nous a été fournie précédemment, sur la puissance réfractive absolue de l'air,

par les expériences de MM. Arago et Biot, et par les observations astronomiques de Delambre. Cette puissance réfractive étant 0.000589, il est clair qu'il faut multiplier par ce nombre tous les nombres de la première colonne du tableau précédent pour avoir les puissances réfractives absolues correspondantes ou les valeurs de n^2-1. Ensuite, si l'on veut en déduire aussi les indices de réfraction, il suffira d'ajouter l'unité et d'extraire la racine carrée de la somme. C'est ainsi que l'on arrive au tableau suivant.

Tableau des puissances réfractives des gaz à 0° et 0^m,76.

Noms des gaz.	Indices de réfraction.	Puissances réfract.	Densité.
Air atmosphérique.. . .	1,000294	0,000589	1
Oxigène.	1,000272	0,000544	1,103
Hydrogène.	1,000138	0,000277	0,068
Azote..	1,000300	0,000601	0,976
Ammoniaque.	1,000385	0.000771	0,591
Acide carbonique. . . .	1,080449	0,000899	1,524
Chlore.	1,000772	0,001545	2,470
Acide hydrochlorique. .	1,000449	0,000899	1,254
Oxide d'azote.	1,000503	0,001007	1,527
Gaz nitreux.	1,000303	0,000606	1,039
Oxide de carbone. . . .	1,000340	0,000681	1,992
Cyanogène.	1,000834	0,001668	1,818
Gaz oléfiant.	1,000678	0,001356	0,980
Gaz des marais.	1,000443	0,000886	0,559
Éther muriatique. . . .	1,001095	0,002191	2,234
Acide hydrocyanique. .	1,000451	0,000903	0,944
Gaz oxi-chloro-carb. .	1.001159	0,002318	3,442
Acide sulfureux.	1,000665	0,001331	2,247
Hydrogène sulfuré. . .	1,000644	0,001288	1,178
Éther sulfurique. . . .	1,00153	0,003061	2,580
Soufre carburé.	1,00150	0,003010	2,644
Hydrogène protophosph.	1,000789	0,001579	1,256

En comparant sous divers points de vue les nombres

contenus dans les tableaux précédens, on en peut tirer les quatre conséquences suivantes.

1° On ne découvre aucun rapport entre les nombres qui représentent les puissances réfractives des gaz et ceux qui représentent leurs densités; car ces nombres croissent, tantôt dans un même ordre, tantôt dans un ordre inverse.

2° La puissance réfractive d'un mélange est égale à la somme des puissances réfractives de ses élémens. Par exemple, l'air étant composé de 0,21 d'oxigène et 0,79 d'azote, on trouve que la somme des puissances réfractives des élémens est 0,99984, qui diffère très-peu de l'unité. M. Dulong a fait aussi des expériences directes sur plusieurs mélanges artificiels, pour vérifier ce résultat qui servait de principe à ses recherches.

3° La puissance réfractive d'un composé gazeux est tantôt plus petite, tantôt plus grande que la somme des puissances réfractives des composans. C'est en effet ce qui résulte du tableau suivant, dans lequel la première colonne représente les puissances réfractives observées, et la seconde les puissances réfractives calculées d'après les élémens constitutifs en tenant compte des condensations qu'ils éprouvent.

Puissances réfractives des fluides élastiques composés.

La puissance réfractive de l'air = 1.

Noms des gaz.	Puiss. réfract. observées.	Puiss. réfract. calculées	Excès de l'obs. sur le calcul.
Ammoniaque.	1,309. . . .	1,216. . . .	+ 0,093
Oxide d'azote.	1,710. . . .	1,482. . . .	+ 0,228
Gaz nitreux.	1,030. . . .	0,972. . . .	+ 0,058
Eau.	1,000. . . .	0,933. . . .	+ 0,067
Gaz chlor-oxi-carb. . .	3,936. . . .	3,784. . . .	+ 0,015
Éther muriatique. . .	3,720. . . .	3,829. . . .	— 0,099
Acide hydrocyanique .	1,521. . . .	1,651. . . .	— 0,130
Acide carbonique. . .	1,526. . . .	1,629. . . .	— 0,093
Acide hydrochlorique .	1,527. . . .	1,547. . . .	— 0,020

Les différences sont trop sensibles pour qu'on puisse les attribuer à des erreurs d'observation, et il est impossible de supposer qu'elles tiennent à un défaut de pureté dans les gaz, parce que l'on connaît l'habileté de M. Dulong et la scrupuleuse exactitude qu'il apporte dans ses préparations.

4° Le pouvoir réfringent d'une substance à l'état liquide est plus grand que le pouvoir réfringent de la même substance à l'état gazeux. Ce principe qui avait été autrefois établi sur des expériences directes par MM. Arago et Petit (*Ann. de chim. et de phys.*, t. 1, pag. 1), se trouve de nouveau confirmé par les résultats de M. Dulong. En effet, le pouvoir réfringent de carbure du soufre par rapport à l'air est égal à sa puissance réfractive par rapport à l'air 5,179 divisée par sa densité 2,644, ce qui donne 1,932 ; le carbure de soufre liquide a une densité 1,263, et son indice de réfraction est 1,678, sa puissance réfractive absolue est donc 1,816 et son pouvoir réfringent absolu 1,438. Mais l'air ayant une puissance réfractive absolue de 0,000588 et une densité par rapport à l'eau de 0,001299, son pouvoir réfringent absolu est 0,453. Par conséquent le pouvoir réfringent du carbure de soufre liquide par rapport à l'air est 1,438 divisé par 0,453 ou 3,176. Ainsi le carbure de soufre a un pouvoir réfringent plus grand que 3 à l'état liquide, et plus petit que 2 à l'état gazeux. Il paraît que MM. Arago et Petit avaient étendu leurs expériences à plusieurs liquides volatils ; mais leurs résultats n'ont pas été publiés, et faute de connaître les indices de réfraction des éthers muriatique et sulfurique et de l'acide hydrocyanique à l'état liquide, nous ne pouvons ici profiter des expériences de M. Dulong pour comparer les pouvoirs réfringens de ces substances à l'état de vapeur et à l'état liquide.

Si le pouvoir réfringent d'un gaz augmente à l'instant où il se liquéfie, il est bien probable qu'il commence à

éprouver quelque changement lorsqu'il approche de son point de condensation, soit qu'il s'y trouve amené par la pression ou par le refroidissement; c'est aussi ce qui résulte des expériences de M. Dulong sur l'éther muriatique, le carbure de soufre et l'éther sulfurique, car, au *maximum* de densité, leurs puissances réfractives par rapport à l'air sont respectivement 3,87, 5,198 et 5,290. Au lieu de 3,72, 5,110 et 5,197.

LENTILLES.

534. *Propriétés générales des lentilles.* Les lentilles sont des corps diaphanes, qui on la propriété d'augmenter ou de diminuer la convergence naturelle des faisceaux de lumière qui les traversent.

Nous ne devons étudier ici que les *lentilles sphériques*, c'est-à-dire, celles dont les surfaces sont des plans ou des sphères, parce qu'elles sont à peu près les seules qui entrent dans la composition des divers instrumens d'optique; les lentilles *elliptiques*, *paraboliques*, *cylindriques*, etc., présentent bien aussi des phénomènes analogues, mais elles sont plus difficiles à travailler, et jusqu'à présent on n'en a fait aucun usage important.

En combinant de toutes les manières possibles les surfaces planes et sphériques on ne peut former que six lentilles différentes, *Fig.* 190 et suivantes.

La première, *Fig.* 190, est la lentille *bi-convexe;* elle est formée de deux surfaces sphériques convexes dont les rayons C R et C′ R′ peuvent être égaux ou inégaux.

La deuxième, *Fig.* 191, est la lentille *plan-convexe;* elle est formée par un plan et par une surface sphérique convexe dont le rayon C R peut être quelconque.

La troisième, *Fig.* 192, est le *menisque-convergent;* elle est formée par deux surfaces sphériques, l'une concave et

l'autre convexe, le rayon CR de la première étant plus grand que le rayon C′R′ de la seconde.

La quatrième, *Fig.* 193, est la lentille *bi-concave;* elle est formée par deux surfaces sphériques concaves, dont les rayons CR et C′R′ peuvent être égaux ou inégaux.

La cinquième, *Fig.* 194, est la lentille *plan-concave;* elle est formée par un plan et par une surface sphérique concave dont le rayon CR peut être quelconque.

La sixième enfin, *Fig.* 195, est le *menisque-divergent;* elle est formée par deux surfaces sphériques, l'une concave et l'autre convexe, le rayon CR de la première étant plus petit que le rayon C′R′ de la seconde.

Les trois premières sont à *bords tranchans,* c'est-à-dire qu'elles sont moins épaisses au bord qu'au milieu; nous verrons qu'elles sont *convergentes,* ou, en d'autres termes, qu'elles augmentent la convergence ou diminuent la divergence des faisceaux qui les traversent.

Les trois dernières sont à *bords larges,* c'est-à-dire, qu'elles sont plus épaisses au bord qu'au milieu; nous verrons qu'elles sont *divergentes,* ou, en d'autres termes, qu'elles diminuent la convergence ou augmentent la divergence des faisceaux qui les traversent.

L'axe d'une lentille est la ligne mathématique CC′ qui joint les deux centres de courbure de ses deux surfaces; pour les lentilles plan-concaves et plan-convexes, l'axe CP est le perpendiculaire abaissé du centre de courbure sur le plan.

Dans l'épaisseur d'une lentille et sur son axe, se trouve un point particulier que l'on nomme le *centre optique;* tous les rayons de lumière qui passent par ce point prennent, en sortant de la lentille, une direction parallèle à celle qu'ils avaient en y entrant.

On démontre par le calcul que si un point lumineux L, *Fig.* 179, est placé sur l'axe d'une lentille à bords tranchans, tous les rayons qu'il envoie sur la lentille et qui la traver-

sent, viennent après leur sortie se concentrer sur l'axe en un même point F. Cette propriété est toujours soumise à certaines conditions que nous examinerons plus tard; mais elle a lieu exclusivement pour les lentilles à bords tranchans, et c'est pour cette raison qu'on les appelle lentilles convergentes. Le point F est le *foyer* du point L, et ces deux points pris relativement sont des foyers conjugués l'un de l'autre, c'est-à-dire, que si le point lumineux était en F les rayons réfractés iraient se concentrer en L, *Fig.* 197.

Pour un point placé à l'infini, tous les rayons incidens sont parallèles entre eux, *Fig.* 198; le foyer F se nomme alors *foyer principal* de la lentille et la distance FC *distance focale principale.*

L'angle EFE′, sous lequel la lentille est vue du *foyer principal,* se nomme *l'ouverture* de la lentille; cet angle ne doit pas dépasser 20 ou 30°; s'il était plus grand, les rayons qui traversent les bords ne viendraient plus concourir exactement au point F comme les rayons plus voisins de l'axe, et il y aurait une *aberration de sphéricité* plus ou moins grande.

Pour un point lumineux situé hors de l'axe en L′, par exemple, *Fig.* 197, les phénomènes sont les mêmes que pour le point L; seulement ils se produisent alors à l'égard de *l'axe secondaire* L′C que l'on obtient en joignant le point L′ au centre optique C.

Ainsi un faisceau BB′, parallèle et oblique à l'axe principal, *Fig.* 198, fait son foyer en F′ sur la ligne CX menée par le centre optique parallèlement aux rayons IB, I′B′, etc., et l'on a CF′ = CF.

Cependant, et ceci est une remarque importante, si *l'axe secondaire* d'un faisceau faisait avec *l'axe principal* un angle plus grand que *dix* ou *quinze* degrés, tous les rayons de ce faisceau ne convergeraient plus exactement au même point après leur réfraction; il y aurait une aberration de

sphéricité, et l'on dirait alors que les points lumineux sont hors du champ de la lentille.

Il en résulte qu'un objet L L′, *Fig.* 197, qui serait compris dans le champ de la lentille et placé sur la surface d'une sphère ayant son centre au centre optique C, donnerait une image renversée très-nette, sur la surface F F′ d'une autre sphère ayant le même centre. Ainsi les objets font des images au foyer des lentilles comme au foyer des miroirs, et, vus du centre optique de la lentille, l'image et l'objet sont vus sous le même angle.

Il nous reste à voir maintenant comment le foyer principal dépend de la courbure de la lentille et de la nature de sa substance, puis à déterminer comment la distance des images dépend de la distance des objets.

535. *Discussion des formules qui expriment la théorie des lentilles.*

Toute la théorie des lentilles est exprimée par les deux formules suivantes :

$$1^{\circ} \ldots\ldots \frac{1}{M} = \frac{1}{F} - \frac{1}{B}$$

$$2^{\circ} \ldots\ldots F = \frac{R\,R'}{(N-1)(R'-R)}.$$

Nous pouvons admettre ces formules comme un résultat du calcul, et nous devons surtout nous attacher à en faire comprendre le sens et l'usage par une discussion détaillée; car elles contiennent le principe de la construction de tous les instrumens d'optique. La première indique la relation qui existe entre la distance focale principale F, la distance de l'objet B et celle de son image M; toutes ces distances étant comptées à partir du centre optique, soit sur l'axe principal, soit sur les axes secondaires. La seconde indique la relation qui existe entre la distance focale principale F, les rayons de cour-

bure R et R′ de la lentille et l'indice N de réfraction de sa substance.

F restant le même, B peut recevoir toutes les valeurs depuis l'infini jusqu'à 0, et à chacune d'elles correspond une valeur particulière de M; le tableau suivant contient les valeurs correspondantes les plus remarquables.

1°. . . $B = \infty$ ..... $M = F$.

2°. . . $B = 100\,F$. $M = \frac{100}{99} F = F + \frac{F}{99}$

3°. . . $B = 2\,F$...., $M = 2\,F$.

4°. . . $B = F$ ..... $M = \infty$

5°. . . $B = \frac{F}{2}$ .... $M = -F$

1° $B = \infty$, signifie que l'objet est placé à une distance infinie, et $M = F$, que l'image se forme alors au foyer principal, *Fig.* 198, c'est-à-dire, à 3 pieds si la distance focale principale est de 3 pieds, et à 10 si elle est de 10 pieds. Ce résultat est de vérité nécessaire, puisqu'on appelle foyer principal le foyer des rayons parallèles. Mais on peut vérifier par l'expérience que la grandeur absolue de l'image est telle que si on la regardait du centre optique de la lentille on la verrait sous le même angle que l'objet. Il suffit pour cela de recevoir l'image solaire sur un écran à la distance où elle paraît avec le plus d'éclat et de netteté, de l'observer avec un verre noir et d'en mesurer la grandeur. On conçoit que si l'écran était de bois ou de papier, il prendrait feu presque à l'instant.

On peut encore faire l'expérience d'une manière plus commode en couvrant la lentille d'une feuille de carton, percée d'un trou très-petit, soit au centre, soit vers les bords. Quelque petitesse que l'on donne à cette ouverture, l'image a toujours la même grandeur, c'est seulement son éclat qui s'affaiblit.

2° B = 100 F signifie que l'objet est placé à 100 fois la distance focale principale; par exemple, à 300 pieds si cette distance est de 3 pieds, et puisque l'image se forme alors à F plus un 99° de F on voit qu'elle n'a reculé que de la 99° partie de F pendant que l'objet s'est avancé depuis l'infini jusqu'à 100 F.

Pour vérifier ce résultat, on peut prendre une lentille d'un long foyer, et après en avoir déterminé la distance focale principale par l'expérience précédente, on cherchera avec un écran le lieu de l'image d'un objet placé très-loin et à une distance connue, si cette distance est juste de 100 F, l'image sera juste reculée de la 99° partie de F.

3° Quand l'objet est placé à une distance double de la distance focale principale, l'image est de l'autre côté de la lentille exactement à la même distance, et par conséquent de la même grandeur. C'est ce que l'on peut vérifier avec la flamme d'une bougie, ou même avec la lumière solaire, dans ce dernier cas, on place la lentille à la distance 2 F du trou de la chambre noire par lequel entre le faisceau de lumière solaire, et l'on constate que c'est à 2 F derrière la lentille que l'image du trou se fait avec netteté. Ainsi pendant que l'objet s'avance depuis l'infini jusqu'à 2 F, l'image recule seulement depuis F à 2 F.

4° Quand l'objet est placé au foyer principal, son image va se faire à l'infini, c'est-à-dire que les rayons émergens sont parallèles; ainsi l'objet et l'image ont changé de rôle; pendant que l'objet s'avance de 2 F à F l'image recule depuis 2 F jusqu'à l'infini. Ce résultat peut être vérifié à peu près avec la flamme d'une bougie; je dis à peu près, parce que la flamme ayant une certaine épaisseur tous ses points ne peuvent être à la fois à la distance focale principale. On obtient plus d'exactitude à cet égard en prenant pour objet l'image formée au foyer d'une première lentille; comme cette image n'a point d'épaisseur, on peut la mettre complétement à la distance focale principale de

la seconde lentille, *Fig.* 185, alors le faisceau émergent E E′ est tout-à-fait parallèle. Il est bon dans cette expérience de mettre un diaphragme G G′ pour arrêter les rayons colorés des bords.

5° Enfin, quand l'objet est à une distance moindre que la distance focale principale, on obtient pour M une valeur négative; ce changement de signe annonce un changement dans la position du foyer, et en effet le foyer se fait alors *en avant* de la lentille (1). *Fig.* 199. Dans ce cas, la lentille diminue seulement la divergence; il n'y a plus qu'un foyer virtuel et une image virtuelle; les rayons émergens sont comme s'ils partaient du point V.

La formule que nous venons de discuter ne s'applique qu'aux lentilles convergentes; celle des lentilles divergentes a la forme suivante :

$$\frac{1}{M} = \frac{1}{F} + \frac{1}{B}$$

Pour $B = \infty$ elle donne $M = F$; ainsi les rayons parallèles sont après leur émergence, comme s'ils partaient du point F, *Fig.* 200.

Pour $B = F$ elle donne $M = \frac{F}{2}$, c'est-à-dire que les rayons émergens sont comme s'ils partaient d'un point placé en avant de la lentille à égale distance du foyer et du centre optique.

---

(1) On sera étonné peut-être que les valeurs de M deviennent négatives quand elles sont comptées du même côté que B dont les valeurs sont toujours positives. Mais cela tient à ce que nous avons pris F positivement pour éviter les changemens de signe qui auraient pu embarrasser cette discussion. La formule algébrique est véritablement pour les lentilles convergentes $\frac{1}{M} = \frac{1}{F} + \frac{1}{B}$ comme pour les lentilles divergentes seulement dans le 1er cas il faut donner à F des valeurs négatives.

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que la valeur de la distance focale principale était connue, ou du moins que l'on pouvait la déterminer par l'expérience; mais on conçoit que l'artiste qui travaille les verres travaillerait toujours au hasard s'il ne pouvait trouver la distance focale d'une lentille que quand elle est faite. Il faut que la science lui apprenne à la trouver d'avance, et lui indique quelle courbure il doit donner à ses verres pour obtenir des foyers d'une longueur donnée. C'est l'objet de la seconde formule que nous avons rapportée plus haute t que nous allons maintenant discuter.

$$F = \frac{R R'}{(N-1)(R' \quad R)}.$$

F, distance focale principale.

R, rayon de courbure de la première surface.

R′, rayon de courbure de la deuxième surface.

N, rapport de réfraction de la substance de la lentille.

Il résulte des suppositions par lesquelles cette formule a été obtenue:

1° Que R représente toujours le rayon de courbure de la *première* surface, c'est-à-dire, de la surface par laquelle *entre* la lumière, et R′ celui de la *deuxième* surface ou de la surface *d'émergence*.

2° Que les rayons de courbure R et R′ doivent être pris positivement quand le centre de la surface à laquelle ils appartiennent se trouve du côté par lequel entre la lumière, et négativement quand il se trouve du côté opposé.

3° Que la lentille sera convergente ou divergente, suivant que la valeur de F sera négative ou positive.

Il est facile de voir d'après cela que, pour chaque espèce de lentille, on a les résultats suivans, qui seraient les mêmes, en définitive, si l'on retournait la lentille, c'est-à-dire, si l'on prenait pour la première surface celle que nous avons prise pour la deuxième et réciproquement.

Lentilles biconvexe. . $R = -$, $R' = +$, $F = +$
Plan convexe . . . . $R = -$, $R' = \infty$, $F = +$
Menisque convergent. $R = -$, $R' = -$, $F = +$ parce que $R < R'$
Biconcave . . . . . $R = +$, $R' = -$, $F = -$
Plan concave. . . . . $R = +$, $R' = \infty$, $F = -$
Menisque divergent. . $R = -$, $R' = -$, $F = -$ parce que $R > R'$.

Ainsi, les trois lentilles à bords tranchans, sont, comme nous l'avons annoncé, des lentilles convergentes, tandis que les trois lentilles à bords larges sont divergentes.

Quant aux valeurs absolues de F, elles seront faciles à calculer lorsqu'on connaîtra R, R' et N. Réciproquement les valeurs de F et de N étant données on pourra déterminer ou les valeurs absolues des rayons de courbure ou du moins la relation qui existe entre elles.

Si l'on voulait, par exemple, faire avec du verre une lentille biconvexe de 4 pieds de distance focale principale, dont les deux rayons de courbure fussent égaux, l'on trouverait que chacun de ces rayons doit aussi avoir 4 pieds.

Pour obtenir la même distance focale avec une lentille plan convexe, on trouverait que le rayon de courbure doit être seulement de 2 pieds.

Pour l'obtenir avec un menisque convergent dans lequel le grand rayon serait double du petit, on trouverait que celui-ci doit être de 1 pied seulement et l'autre de 2 pieds, celui-ci appartient à la surface concave.

Enfin, pour fabriquer avec le même verre une lentille divergente de même distance focale, il faudrait employer des rayons de mêmes grandeurs respectives que les précédens, c'est-à-dire, deux rayons de 4 pieds pour la lentille biconcave, un rayon de 2 pieds pour la lentille plan concave, et deux rayons l'un de 1 pied et l'autre de 2 pieds

pour le menisque divergent, ce dernier appartenant alors alors à la surface convexe.

Pour compléter cette discussion il y aurait encore à examiner le cas où le faisceau qui tombe sur une lentille convergente ou divergente est un faisceau déjà convergent et non pas un faisceau parallèle ou divergent comme nous l'avons supposé; mais ces détails sont des conséquences si simples de ce que nous avons dit, qu'on n'éprouvera sans doute aucune difficulté à en faire l'analyse.

536. *Lentilles à échelons.* Ces lentilles se composent d'une lentille ordinaire plan convexe A A′, *Fig.* 196, et de pièces sphéro-prismatiques annulaires B B′, C C′, D D′, etc., qui s'enveloppent exactement l'une l'autre; chacun de ces anneaux est travaillé pour remplir deux conditions; 1° pour que la lumière parallèle qu'il reçoit puisse le traverser librement sans tomber sur la surface latérale *l* qui reste dépolie; 2° pour que la lumière qui le traverse vienne faire son foyer au même lieu que la lumière qui traverse la lentille centrale A A′; c'est surtout pour remplir cette dernière condition qu'il faut calculer convenablement les courbures des faces *b*, *c*, *d*, etc. Par cet artifice on peut donner aux lentilles à échelons beaucoup plus d'ouverture qu'aux lentilles ordinaires, et, de plus, le verre n'ayant que peu d'épaisseur il n'absorbe qu'une faible proportion de lumière. Au foyer d'une telle lentille, de 20 ou 24 pouces de diamètre et de 12 à 15 pouces de distance focale principale, l'image du soleil a un très-vif éclat, et la chaleur qu'elle donne est capable de brûler rapidement l'étain, le zinc, le cuivre ou le fer, et de fondre des feuilles d'or ou même de platine.

Buffon avait eu l'idée de construire des lentilles de cette espèce; mais on ne put jamais en obtenir de bons résultats parce qu'on voulait les tailler dans une seule pièce de verre. Ces essais étaient tombés dans l'oubli, quand Fresnel fut ramené de nouveau à la même invention par une autre

voie, et avec un succès complet. Fresnel calcula les courbures de chacun des anneaux, et indiqua les procédés pour les travailler avec une exactitude suffisante. Il fit ensuite avec M. Arago des expériences sur les meilleurs moyens de produire une vive lumière au foyer de ces lentilles. Il en est résulté pour l'établissement des phares un nouveau système qui a une grande supériorité sur les systèmes anciens, et qui est adopté maintenant pour toutes les côtes de France. Déjà, le phare de Cordouan établi sur ces principes, montre les immenses avantages que la navigation en pourra tirer. Une lampe à quatre mèches concentriques, placée au foyer de ces lentilles, devient visible en mer jusqu'à la distance de 10 ou douze lieues, et les apparences de chaque feu peuvent être diversifiées pour ainsi dire à volonté, de manière qu'il ne reste aux navigateurs aucune chance pour confondre deux feux voisins.

CHAPITRE III.

Décomposition et recompositon de la lumière.

537. *La lumière blanche du soleil se compose de rayons diversement colorés.* Cette vérité fondamentale ne peut être établie que par une série d'expériences : premièrement, on dispose devant le volet de la chambre noire un miroir de métal M M′ qui réfléchisse, dans une direction donnée, le faisceau de lumière solaire qu'il reçoit. Supposons, par exemple, que ce faisceau soit réfléchi horizontalement, et qu'après avoir pénétré dans la chambre noire par une ouverture circulaire de 4 ou 5 millimètres de diamètre, il se propage dans la direction O G, *Fig.* 201. En G, sur le tableau, il porte une image ronde du soleil qui est représentée de face en G G′, *Fig.* 202. Le diamètre de cette image augmente avec la distance du tableau, suivant une loi très-simple. Secondement, l'on dispose près du volet un prisme A S A′ de verre ou de flint, et le faisceau primitif est non-seulement réfracté dans la direction P R, mais il apporte en R U une image oblongue et colorée, qui est le *spectre solaire*, *Fig.* 201 et 202.

On peut alors démontrer que le spectre est soumis aux trois conditions suivantes : 1° que, parallèlement aux arêtes du prisme, son diamètre D D′ est toujours égal au diamètre D D′ de l'image directe, qui serait reçue à la même distance ; 2° que, perpendiculairement aux arêtes, sa longueur R U est dépendante de l'angle réfringent du prisme et de la nature de sa substance ; 3° que quand R U est moindre que le double de D D′, le spectre est blanc vers le milieu et coloré seulement vers les extrémités R et U, et

qu'il est complétement coloré dans toute sa longueur, quand RU est plus grand que le double de DD'.

Pour constater le premier de ces résultats, il suffit de répéter l'expérience précédente avec des prismes de substances très-différentes, et d'angles réfringents quelconques.

Pour constater le second, l'on peut employer le *prisme variable*, qui est représenté dans la figure 203. Le pied P, et les deux bouts ET et B'T' sont en cuivre; tandis que les deux faces FA et F'A' sont des lames de verre montées dans des cadres en métal; l'une d'elles est fixe, l'autre est mobile, et peut être parallèle, ou inclinée à la première sous des angles différens. Cet appareil substitué au prisme ASA' de la *Fig.* 201, n'imprime d'abord aucune déviation au faisceau direct; ce qui prouve le parallélisme des deux côtés dans chacune des lames AF' A' F'; mais lorsqu'on y verse un liquide transparent, on voit à l'instant le faisceau se dévier et se décomposer. Ensuite, on fait varier à la fois la déviation et la coloration, en inclinant plus ou moins la face F' sur la face F. Pour faire voir ensuite que la longueur du spectre dépend de la nature de la substance du prisme, on peut d'abord, pour les liquides, verser successivement divers liquides dans le *prisme variable* en lui conservant le même angle et observer les longueurs des spectres correspondans; mais, pour les solides, on se sert du *polyprisme* qui est représenté dans la figure 204; cet appareil est un assemblage de prismes de différentes substances superposés bout à bout et ayant tous le même angle refringent; en le promenant devant l'ouverture on oblige le faisceau à traverser successivement les diverses substances avec la même obliquité, et l'on obtient ainsi des spectres inégalement déviés, et inégalement colorés.

Enfin, pour constater le troisième résultat on peut se servir encore du prisme variable, en partant du point où la face F' est parallèle à la face F, et en augmentant l'angle

graduellement : d'abord l'image est ronde et blanche, puis oblongue et colorée aux deux bouts seulement ; puis quand le spectre est bien développé, et que la séparation des couleurs est complète, on distingue sur sa longueur les sept nuances suivantes ;

Rouge,
Orangé,
Jaune,
Vert,
Bleu,
Indigo,
Violet.

Il importe de remarquer qu'elles sont toujours dans le même ordre relatif, et que, par rapport au prisme, c'est toujours le rouge qui éprouve la moindre déviation. Ce sont ces nuances que l'on appelle ordinairement les *couleurs du prisme*, les *couleurs du spectre*, les *couleurs de l'iris* ou *de l'arc-en-ciel*, les *couleurs simples*, etc.; mais nous verrons que si nos yeux ne comptent que sept couleurs dans le spectre, il est vrai de dire cependant qu'il y en a une infinité.

La séparation des couleurs a lieu d'une manière assez complète, quand on reçoit le spectre à 6 mètres de distance, le prisme ayant un angle réfringent de 60°, et l'ouverture du volet étant un cercle de 1 centimètre de diamètre. Cependant elle est plus complète encore quand l'ouverture est plus petite : c'est ce que l'on peut apprécier par une seule expérience, en faisant tomber simultanément sur le prisme plusieurs faisceaux par des ouvertures voisines comme les représente la figure 205, ou, mieux encore, en faisant tomber un seul faisceau par un triangle isocèle très-allongé, dont la hauteur s M soit parallèle aux arêtes du prisme, *Fig.* 206.

Pour donner au spectre des limites plus nettes et mieux

tranchées, on peut encore adopter la disposition suivante qui a été employée par Newton. A 4 mètres de l'ouverture o, *Fig.* 207, on place une lentille ayant 2 mètres de distance focale principale, sur laquelle on fait tomber un faisceau de lumière solaire; alors l'image de l'ouverture va se peindre de grandeur naturelle en o′, à la même distance de 4 mètres (535, 3°); mais immédiatement derrière la lentille, on place le prisme A S A′, qui décompose la lumière incidente et donne en R U un spectre qui est nettement défini, et très-brillant, parce qu'il contient dans un bien moindre espace toute la lumière qu'il contiendrait, si la lentille n'y était pas.

Dans toutes les expériences précédentes et dans les suivantes, nous supposons que les arêtes du prisme sont horizontales; mais, dans les appartemens ordinaires, il est plus commode de les disposer verticalement. Dans tous les cas, il faut avoir le plus grand soin d'éviter la lumière diffuse, et surtout la lumière des nuées qui entre par l'ouverture.

538. *Les rayons diversement colorés sont diversement réfrangibles.*

Cette vérité résulte déjà de la forme dilatée du spectre; car il est évident que la lumière violette, qui tombe en U, *Fig.* 201, forme, au sortir du prisme, un angle d'émergence plus grand que la lumière rouge qui tombe en R; et comme elles ont l'une et l'autre une même incidence sur la première face du prisme, il faut bien en conclure que le violet est plus réfrangible que le rouge. Le même raisonnement fait voir que les nuances intermédiaires ont des réfrangibilités intermédiaires.

Mais voici quatre expériences qui conduisent à la même conséquence d'une manière plus directe et plus frappante.

1° On reçoit le spectre sur un écran K K′, *Fig.* 208, percé d'une petite ouverture o′; derrière cette ouverture on fixe dans une position déterminée un second prisme qui

fait éprouver une seconde réfraction à la lumière, et l'on marque sur le tableau T T′ le point où vient tomber l'image. Or, en faisant tourner le premier prisme, on peut faire passer successivement toutes les nuances par l'ouverture o′ de l'écran, et l'on reconnaît ainsi que le violet, par exemple, tombe en V′, après la seconde réfraction, l'indigo un peu plus bas, le bleu un peu plus bas encore, et enfin, le rouge en R′. Donc, dans le premier spectre, l'ordre des nuances que nous avons indiqué donne aussi l'ordre des réfrangibilités.

2° L'expérience des *prismes croisés* conduit au même résultat; elle est encore plus simple et plus facile. On marque sur le tableau le lieu o′ de l'image solaire qui est formée par le faisceau direct, *Fig.* 210. Ensuite on place à quelques centimètres derrière l'ouverture, un prisme *horizontal* P, qui produit sur le tableau un spectre R V; enfin on place un prisme *vertical* P′, à quelques centimètres derrière le premier, et l'on obtient un spectre R′ V′. Par ce second prisme, la lumière rouge, qui allait tomber en R, est réfractée en R′, et la lumière violette, qui allait tomber en V, est réfractée en V′; l'obliquité du spectre R′ V′ est une preuve que la réfrangibilité va croissant depuis le rouge jusqu'au violet, puisque toutes les couleurs ayant la même incidence à leur entrée dans le second prisme, ont en sortant des angles d'émergence croissant depuis le rouge jusqu'au violet.

Les prismes sont ponctués dans la figure, parce qu'ils sont bien loin du tableau sur lequel nous les avons rapportés.

3° On fait tomber successivement toutes les nuances du spectre sur une carte imprimée en caractères très-fins, et après avoir placé au-devant de cette carte une lentille ayant une grande distance focale principale, on va recevoir à une distance convenable, sur un carton blanc, l'image des lettres au point où elles sont le plus nette-

ment dessinées; on reconnaît ainsi que, pour la lumière rouge, le carton doit être très-sensiblement plus loin que pour l'orangée, et pour celle-ci plus loin que pour le jaune, etc., etc.

4° On dispose un prisme rectangulaire, de manière que le faisceau réfracté se présente pour sortir par l'hypoténuse *Fig.* 209, et il sort en effet sous une certaine obliquité pour donner naissance à un spectre RU; mais en inclinant le prisme graduellement, on reconnaît bientôt que ce spectre devient incomplet; le violet disparaît d'abord, puis l'indigo, le bleu, etc., et enfin le rouge, qui disparaît le dernier. Ces couleurs disparaissent lorsqu'elles tombent sur l'hypoténuse avec une assez grande obliquité pour éprouver la réflexion totale (525), et puisqu'elles disparaissent successivement en commençant par le violet, c'est une preuve qu'elles ont des réfrangibilités décroissantes à partir du violet.

Les expériences précédentes ne s'appliquent pas seulement aux sept nuances que nous avons remarquées dans le spectre, mais elles s'appliquent aussi aux divers rayons d'une même nuance. Par exemple, le rouge R, qui est tout-à-fait à l'extrémité du spectre *Fig.* 207, et que l'on appelle pour cette raison le *rouge extrême*, se trouve sensiblement moins réfrangible que le *rouge moyen* M, et à plus forte raison moins réfrangible que le *rouge limite de l'orangé*. Il en est de même de tous les rayons dans toute la longueur du spectre, depuis le *rouge extrême*, jusqu'au violet extrême. C'est cette réfrangibilité graduellement croissante, qui nous conduit à admettre qu'il y a dans la lumière blanche une *infinité* de couleurs différentes : en effet, si l'on regarde attentivement le rouge extrême et le rouge moyen, on reconnaît bientôt qu'ils ne donnent pas la même teinte; en parcourant d'un bout à l'autre toute l'étendue du spectre, on peut s'assurer qu'il y a une dégradation continue ou plutôt un changement de

teinte continuel d'une bande à la suivante. Il ne faut donc pas supposer avec quelques auteurs, que Newton n'a vu que sept nuances ou sept couleurs dans le spectre; il en a vu une infinité, et c'est seulement pour fixer les idées, qu'il a donné des noms aux couleurs qui sont pour l'œil les plus apparentes et les plus distinctes.

Cette observation nous permet de faire maintenant une analyse plus complète de la lumière blanche et du spectre qu'elle produit : imaginons, pour un instant, qu'il n'y ait dans la lumière blanche que le rouge extrême et le violet extrême; alors il est clair qu'au lieu d'un spectre, nous aurions seulement deux images du soleil, rondes, colorées et séparées, l'une rouge en R, et l'autre violette en V, *Fig.* 211. Mais le rouge qui avoisine le rouge extrême, et qui est un peu plus réfrangible que lui, donne aussi une image ronde qui se superpose en grande partie sur la première, en se rapprochant du violet, *Fig.* 211 *bis*. Le rouge suivant donne encore une image pareille, qui se superpose en grande partie sur la précédente, et ainsi de suite jusqu'au violet extrême. Ainsi, dans les expériences ordinaires, le spectre est composé d'une infinité d'images circulaires empiétant les unes sur les autres, et rigoureusement parlant, une zône étroite quelconque *a b*, faisant partie d'un grand nombre de cercles voisins, se trouve composée d'un grand nombre de lumières qui diffèrent en couleur et en réfrangibilité; seulement, si les cercles sont d'un petit diamètre, les couleurs seront à peu près identiques, et les réfrangibilités à peu près égales; c'est pourquoi cette zône peut être considérée comme composée d'une seule et même lumière.

539. *Chaque couleur du spectre est une couleur simple.* Une couleur est simple quand elle se retrouve toujours la même sans qu'il soit possible par aucune action d'en faire sortir des nuances différentes, et nous allons faire voir qu'en effet les couleurs du spectre peuvent bien être détruites, mais qu'elles ne peuvent par aucune cause être

modifiées pour nos yeux. Elles sont en cela bien différentes des couleurs naturelles des corps ; car celles-ci peuvent toutes, comme nous le verrons bientôt, donner naissance à des teintes élémentaires tout-à-fait distinctes des teintes primitives. Dans le vermillon, par exemple, nous pourrons développer du jaune, nous développerons du vert dans l'indigo ; et des plus vives couleurs que nous offre la nature, il n'y en a pas une qui ne puisse être décomposée de la sorte.

La simplicité ou l'inaltérabilité des couleurs du spectre, se démontre par une foule d'expériences entre lesquelles nous choisirons seulement les suivantes.

1° Après avoir isolé, avec un écran percé d'un petit trou, un pinceau quelconque du spectre, le violet, par exemple, on peut le faire passer par un nombre quelconque de prismes, de lentilles ou d'autres corps réfringens, sans y découvrir d'autre nuance que le violet primitif.

2° Si l'on fait tomber ce pinceau violet sur un corps d'une couleur différente, rouge, jaune, vert, etc., ce corps devient violet, sans qu'on puisse y découvrir aucune trace de la couleur primitive qu'il offre naturellement et qui lui semble propre et inhérente. On en peut faire l'expérience sur les feuilles des plantes, les fleurs, le vermillon, l'or, etc., etc. ; tous ces corps prennent alors la même nuance, ils deviennent violets comme si cette couleur était leur véritable couleur naturelle. Pareillement, dans le rouge, tous les corps sont rouges, jaunes dans le jaune, verts dans le vert, etc.

3° Un pinceau violet qui se présente pour traverser un corps diaphane rouge, jaune ou vert, se trouve absorbé et détruit, ou bien, s'il passe, il est violet à sa sortie comme il l'était à son entrée. Cette expérience est surtout frappante avec des verres colorés en rouge : tel de ces verres laisse passer librement la lumière violette, tel autre l'absorbe en totalité ; bien qu'à les regarder tous deux à la lumière du

ciel ils paraissent également colorés et également transparens. Celui qui absorbe le violet, absorbe en général toutes les autres nuances du spectre, excepté le rouge; ainsi, c'est un corps *transparent pour le rouge*, et plus ou moins *opaque pour les autres couleurs*.

On dit quelquefois, d'après Newton, que la lumière simple est homogène, mais cette expression est inexacte, parce qu'elle semble indiquer que toutes les parties de cette lumière éprouvent toujours les mêmes effets; or, il est facile de vérifier, qu'un rayon de lumière simple, est en partie réfléchi à la surface d'un corps diaphane, et en partie réfracté dans son intérieur; ainsi, ces deux parties ne sont pas identiques, puisqu'elles éprouvent des effets différens. Il en est de même lorsqu'on fait tomber un pinceau de lumière simple sur un corps doué de la double réfraction, car ce pinceau se partage alors en deux autres qui suivent des routes différentes. En général, il n'arrive presque jamais qu'un rayon simple du spectre éprouve identiquement les mêmes effets dans tout son ensemble.

540. *On recompose la lumière blanche en ramenant toutes les couleurs simples dans la même direction ou en les faisant toutes concourir au même point.*

Quand les couleurs ont été séparées par un prisme, on peut les ramener dans la même direction par un second prisme de même substance et de même angle réfringent que le premier, mais tourné en sens inverse, *Fig.* 212. Alors le faisceau, qui est coloré entre les deux prismes, devient blanc au sortir du second, et va peindre sur le tableau une image ronde du soleil. Si le second prisme est à larges faces, on peut le placer très-loin du premier, de telle sorte qu'il reçoive un spectre très-complet. Cette expérience montre assez clairement qu'il n'y a dans un prisme aucune force particulière pour décomposer la lumière blanche ou pour la récomposer, mais que la séparation des couleurs

simples ou leur réunion se fait d'elle-même par l'inégale réfrangibilité des divers rayons. Pour opposer deux prismes qui soient exactement de même angle, on peut encore employer une cuve rectangulaire de glace, séparée en deux compartimens prismastiques, par une cloison diagonale, pareillement en glace c c', *Fig.* 217. Lorsqu'on met de l'eau dans le premier compartiment, le faisceau émergent forme un spectre; mais il reprend sa direction et sa blancheur primitive, dès qu'on remplit d'eau le second compartiment comme le premier.

Il n'est pas nécessaire que toutes les couleurs simples soient, comme dans l'expérience précédente, ramenées dans la même direction pour former du blanc; il suffit seulement qu'elles concourent au même point, comme nous allons le voir par les expériences suivantes.

1° On reçoit le spectre sur un grand miroir concave M M', *Fig.* 213, et l'on dirige le faisceau réfléchi, soit dans le faisceau incident lui-même, soit au dehors, comme le représente la figure. Alors, toutes les nuances du spectre réfléchies dans des directions différentes viennent concourir au même point F, et là, l'image solaire reçue sur un petit écran ou sur un verre dépoli paraît d'une blancheur éblouissante, comme si le faisceau incident était un faisceau de lumière directe. Il suffit donc du concours de toutes les nuances simples pour produire du blanc. Mais si, au lieu de recevoir le faisceau réfléchi au foyer même où le concours est complet, on le reçoit plus près ou plus loin du miroir, on n'observe qu'une recomposition imparfaite; plus près les couleurs extrêmes du spectre reparaissent dans leur ordre, plus loin elles reparaissent dans un ordre inverse en R' V'. Enfin, si l'on place au foyer un petit miroir métallique très-poli m m', il n'y a aucun doute que la lumière qui tombe sur lui ne soit blanche comme celle qui tombait tout à l'heure sur l'écran, et cependant l'image réfléchie par ce miroir est un spectre R'' V''; ce qui prouve

évidemment qu'en se réunissant au foyer les divers rayons conservent leur existence indépendante et ne se modifient nullement les uns les autres.

2° On reçoit le spectre sur une lentille LL', *Fig.* 214, et au point F où convergent tous les rayons divers, on obtient une lumière blanche comme au foyer du miroir précédent. L'image ronde qui en résulte est seulement colorée vers ses bords, parce que les rayons de réfrangibilités différentes ne peuvent pas faire leur foyer exactement à la même distance derrière la lentille. Au-delà du foyer le spectre reparait, mais renversé en R' V'; ce qui est une nouvelle preuve que les rayons peuvent se croiser au même point sans se modifier, et que chacun d'eux se comporte toujours comme s'il était seul. Enfin, le petit miroir *m m'* que l'on placerait au point F et qui recevrait de la lumière blanche comme dans l'expérience précédente, renverrait cependant de la lumière colorée et reproduirait un autre spectre renversé R" V".

3° On adapte au volet de la chambre noire un grand *prisme à fenêtres*, *Fig.* 215 *bis*, qui n'est autre chose qu'un prisme creux en glace, maintenu contre la plaque de cuivre c c' dans laquelle on a menagé des ouvertures A, B, C, D, etc. Un grand réflecteur renvoie les rayons du soleil sur toute la face c c', et quand il n'y a pas de liquide dans le prisme, chaque ouverture donne seulement une image blanche; mais dès que le prisme est rempli d'eau ou d'un autre liquide, la lumière est décomposée, et il en résulte des spectres A'', B'', C'', etc. A une petite distance ces spectres restent séparés et conservent leurs couleurs distinctes; plus loin ils empiètent les uns sur les autres, leurs couleurs se mêlent au point de former du blanc; plus loin encore, la lumière blanche s'affaiblit de plus en plus, à tel point qu'on distingue seulement un seul spectre comme s'il n'y avait qu'une seule ouverture. Dans cette expérience la lumière blanche que l'on obtient résulte évidemment

du concours ou de la superposition de toutes les nuances simples, chacun des faisceaux A'', B'', etc., fournissant une nuance différente, l'un le violet, l'autre le bleu, etc., jusqu'au dernier qui donne le rouge.

4° Il y a enfin un *moyen mécanique* de recomposer la lumière blanche, dont l'effet semble toujours fort surprenant. Imaginons un cercle en carton, *Fig.* 215, ayant environ 1 pied de diamètre, percé en son centre d'un petit trou c, et offrant deux zones peintes en noir, l'une z près du centre, l'autre z' près du bord. Dans l'intervalle de ces deux zones on colle de petites bandes de papier R R', OO', JJ', etc. La première d'un rouge qui imite autant qu'il est possible le rouge du spectre, la deuxième orangée, la troisième jaune, etc.; quand la période des sept nuances est épuisée on recommence dans le même ordre, pour achever le cercle, avec l'attention que toutes les périodes soient complètes, et que dans chacune d'elles les bandes aient des largeurs à peu près proportionnelles à l'espace que les diverses couleurs occupent dans la longueur du spectre. Lorsqu'un tel carton est mis en mouvement rapide autour de son centre, soit avec la main sur une tige qui passe par l'ouverture centrale, soit par quelque autre moyen, toutes les nuances des bandes colorées disparaissent, et l'intervalle des zones noires z et z' paraît d'un blanc plus ou moins complet. Ce phénomène singulier peut s'expliquer de la manière suivante : s'il n'y avait qu'une seule bande rouge R R' sur un fond noir, on verrait par la rotation un cercle rouge, comme dans l'expérience si connue du charbon allumé que l'on tourne en rond avec une grande rapidité; s'il n'y avait qu'une seule bande violette, on verrait par la même raison un cercle violet, puis un cercle vert pour une bande verte, un jaune pour une bande jaune, etc. Or, si toutes ces bandes existent et tournent en même temps, on verra à la fois au même lieu, un cercle rouge, un orangé, un jaune, etc., et par conséquent un cercle

blanc, puisque la sensation du blanc n'est que la sensation simultanée de toutes ces nuances.

541. *Des couleurs complémentaires et des nuances produites par le mélange de diverses couleurs simples en diverses proportions.*

Puisque toutes les couleurs simples, prises ensemble dans leur *proportion naturelle* (c'est-à-dire, dans la proportion que donne le spectre), reproduisent la lumière blanche, il est évident que, pour altérer la blancheur, il suffit de supprimer l'une des couleurs simples, ou seulement d'en altérer la proportion. Ainsi, en supprimant le rouge dans le spectre, et en composant entre elles toutes les couleurs restantes, on obtient une teinte bleuâtre; cette teinte mêlée au rouge reproduit du blanc. Toutes les fois que deux couleurs simples ou composées remplissent cette condition, c'est-à-dire, toutes les fois que, mêlées ensemble, elles reproduisent du blanc, elles sont dites *complémentaires* l'une de l'autre. Il n'y a pas de couleur, quelle qu'elle soit, qui n'ait sa couleur complémentaire; car, si elle n'est pas blanche, il lui manque seulement quelques-uns des élémens de la lumière blanche, et ces élémens mélangés entre eux forment sa couleur complémentaire. Mais si au mélange de ces élémens on ajoutait du blanc en diverses proportions, on aurait autant de nuances différentes qui seraient toutes également efficaces pour reproduire la couleur blanche avec la couleur donnée. Il y a donc rigoureusement une infinité de nuances différentes qui ont la même couleur complémentaire, et une infinité de nuances complémentaires qui appartiennent à la même couleur donnée. La plupart des verts ont pour couleurs complémentaires des violets plus ou moins rougeâtres, et les jaunes des indigos plus ou moins violacés. Pour étudier, par l'expérience, les teintes qui résultent de plusieurs couleurs simples mélangées, on peut employer l'appareil à sept miroirs représenté dans la figure 218. On le

place à une assez grande distance du prisme pour que le spectre soit bien étalé, et l'on incline convenablement les miroirs pour diriger en un même point d'une feuille de papier très-blanc, celles des nuances dont on veut observer la composition. Il paraît que Newton a fait un grand nombre d'expériences sur ce sujet, soit par cette méthode, soit par d'autres analogues, et il est ensuite parvenu à une construction géométrique très-remarquable qui représente avec une fidélité étonnante le résultat de toutes ces expériences. Nous pouvons seulement décrire cette construction et en indiquer l'usage; car Newton, après l'avoir vérifiée par l'expérience, ne l'a justifiée par le raisonnement dans aucun de ses ouvrages, et personne jusqu'à présent n'a pu deviner la liaison cachée qu'elle a sans doute avec la théorie.

On divise la circonférence du cercle ROJVBIU, *Fig.* 219, en sept parties qui aient les grandeurs suivantes :

RO	= 60° . . .	45′ . . .	34″
OJ	= 34 . . .	10 . . .	38
JV	= 54 . . .	41 . . .	1
VB	= 60 . . .	45 . . .	34
BI	= 54 . . .	41 . . .	1
IU	= 34 . . .	10 . . .	38
UR	= 60 . . .	45 . . .	34

En supposant que ces sept arcs représentent les sept couleurs simples, savoir, RO le rouge, OJ l'orangé, etc., leurs centres de gravité r, o, j, v, b, i, u, ainsi que le centre de gravité C de la circonférence entière, sont les forces qu'il faut composer entre elles pour avoir la nuance qui résulte de plusieurs couleurs simples données.

D'abord, si l'on veut savoir la couleur que donne le mélange de toutes les nuances, il faut composer ensemble les sept centres de gravité des sept arcs, comme on compose des forces parallèles; leur résultante passant évi-

demment par le centre, c'est une preuve que la nuance du mélange est le blanc parfait.

Pour composer, par exemple, le rouge avec une certaine proportion de blanc, il faudra attribuer au centre de gravité c une certaine valeur dépendante de la proportion de blanc que l'on veut mélanger; cette valeur sera égale à la somme des valeurs des centres de gravité, *r*, *o*, *j*, etc., si la proportion de blanc est celle qui résulte du mélange de toutes les nuances; elle en sera la moitié, si l'on ne prend qu'une proportion de blanc moitié, etc.; ensuite, on composera ce centre de gravité avec *r*, la résultante tombant évidemment sur la ligne rc; c'est une preuve que la teinte du mélange sera rougeâtre et d'autant plus lavée de blanc, que la résultante tombera plus près du centre c. On agirait de même pour composer avec du blanc l'une quelconque des nuances simples.

En suivant la même règle, il est facile de voir,

1° Que deux couleurs simples consécutives donnent toujours par leur mélange une nuance intermédiaire. Le rouge et l'orangé donnent un rouge plus voisin de l'orangé, ou un orangé plus voisin du rouge, etc.

Newton cependant recommande de ne pas appliquer cette règle au rouge et au violet, qui ne se suivent pas dans le spectre.

2° Que deux couleurs distantes d'un rang donneront, par leur mélange, la couleur qui les sépare. Ainsi, on a le tableau suivant :

Le rouge et le jaune donnent de l'orangé.
L'orangé et le vert. . . . . du jaune.
Le jaune et le bleu. . . . . du vert.
Le vert et l'indigo. . . . . du bleu.
Le bleu et le violet. . . . . de l'indigo.

Mais l'indigo et le rouge donnent une espèce de pourpre qui diffère sensiblement du violet.

3° Que deux couleurs distantes de deux rangs donnent aussi l'une des nuances qui les séparent, mais que cette nuance est comme si elle était lavée d'une assez grande quantité de blanc.

On peut appliquer aisément le calcul à cette construction empirique, et trouver la nuance qui résulte du mélange d'un nombre quelconque de couleurs simples prises dans des proportions quelconques.

542. *Toute lumière composée éprouve en se réfractant une décomposition et une recomposition.*

Suivons maintenant la marche d'un pinceau de lumière blanche qui traverse obliquement une lame à faces parallèles. Soit AA′, *Fig.* 225, la face supérieure de cette lame, BB′ sa face inférieure, et LI la direction du pinceau incident qui sera supposé venir de l'infini. Le rayon LI sera décomposé par la réfraction en une infinité de rayons diversement colorés, depuis le rouge extrême qui prendra la direction IR, jusqu'au violet extrême qui prendra la direction IU; et la loi de Descartes (525) s'appliquant aux premiers comme aux derniers, chacun d'eux produit un rayon émergent parallèle à LI, ce qui donne en somme un petit pinceau parallèle dont les rayons depuis RE à UE présentent toutes les nuances du spectre. Ce résultat semble d'abord contraire à l'expérience, car on sait que la lumière blanche n'est pas décomposée en traversant les lames parallèles, quelle que soit leur nature. Mais il suffit de considérer l'ensemble des rayons voisins du rayon LI, pour se rendre compte de cette contradiction apparente. En effet, L′I′, par exemple, donne comme LI dans l'intérieur de la lame un pinceau dilaté qui présente toutes les nuances du spectre, et à l'extérieur, un pinceau parallèle R′E′, U′E′, en tout pareil à RE, UE. De plus, chacun des rayons du second est parallèle à son homologue dans le premier; il en serait de même de tous les rayons compris entre LI et L′I′, et c'est là précisément ce qui explique la blancheur

du faisceau émergent. Car il y a près de LI un rayon incident, qui donne un rayon orangé suivant RE; un peu plus loin, il y en a un autre qui donne un rayon jaune suivant la même ligne, un autre qui en donne un vert, un autre un bleu, etc.; d'où il résulte enfin que tous les rayons émergens sont des rayons blancs, excepté toutefois ceux qui se trouvent aux bords du pinceau en RE et U'E'; mais ceux-ci sont en général modifiés par la diffraction, et il n'est pas possible d'y reconnaître les nuances que la simple décomposition leur donne.

On voit en même temps que la décomposition subsiste dans l'intérieur même de la lame, et l'œil qui serait placé quelque part dans son épaisseur, recevant les rayons rouges dans une direction, et les violets dans un autre, verrait en des points différens, le rouge, le violet et les nuances intermédiaires, c'est-à-dire, qu'il distinguerait un spectre au lieu d'une image blanche. Cependant, les corps éclairés par ces divers rayons seraient comme s'ils étaient éclairés par des rayons blancs, parce que les rayons qui concourrent en un point d'un corps opaque, en suivant des directions peu différentes, produisent le même effet que s'ils arrivaient en ce point dans la même direction.

L'analyse précédente nous fait voir que c'est aux surfaces des corps réfringens que s'accomplissent à la fois les réfractions, les décompositions et les recompositions de la lumière. Nous pourrions citer un grand nombre d'exemples de ces phénomènes, mais nous nous bornerons à indiquer encore deux expériences qui montrent d'une manière assez curieuse le jeu de ces décompositions et recompositions successives.

1° Lorsqu'on fait tomber un petit pinceau de lumière solaire sur un prisme équilatéral ABC, *Fig.* 220, dans une direction convenable LI, et au tiers à peu près de son côté, on observe six images autour du prisme; chaque face en

donne deux, l'une blanche, et l'autre colorée formant un spectre complet. En suivant sur la figure la marche de la lumière, on pourra facilement se rendre compte de ce phénomène : on verra qu'à la deuxième incidence I_2, le rayon violet u tombant plus obliquement que le rayon rouge r, doit sortir aussi plus obliquement ; c'est pourquoi, ces rayons et les rayons intermédiaires formeront un premier spectre S_1 ; à la troisième incidence I_3, qui résulte de la réflexion en I_2, le rayon violet u tombe moins obliquement que le rayon rouge r ; ils sont l'un et l'autre comme s'ils venaient d'un point I', après être entrés par une face B C' parallèle à A C ; ainsi, ils doivent sortir parallèlement et donner une première image blanche B_1 ; à la quatrième incidence I_4, ils donnent un deuxième spectre S_2 ; à la cinquième incidence I_5, une deuxième image blanche B_2, etc., etc.

2° On forme une image du soleil au foyer d'une lentille au moyen d'un large faisceau de lumière directe, *Fig.* 221, ensuite on présente un carton blanc successivement au foyer, puis à une moindre, puis à une plus grande distance de la lentille. Au foyer en c, l'image est complétement blanche, plus près de la lentille en c', elle est blanche au centre et entourée vers ses bords d'une auréole rouge et jaune ; plus loin en c'', elle est encore blanche au milieu, mais vers ses bords elle est entourée d'une auréole bleue et violette.

Ce premier résultat est facile à expliquer ; chaque rayon incident est décomposé par la lentille comme il le serait par un prisme ; il en résulte par conséquent un nombre infini de spectres dont la superposition est tantôt complète, tantôt imparfaite. Le rouge, comme moins réfrangible, va faire son foyer plus loin en R, tandis que le violet fait son foyer en U ; ainsi, quand le tableau est en c', on a une image blanche H H' avec une auréole G H, G' H' dont le rouge est en dehors. Quand il est en c'', on a une

image blanche NN′ avec une auréole violette VN, V′N′; enfin, quand il est en C, on a une image BB′ complétement blanche, parce que les rayons violets qui se sont croisés en U viennent tomber au même point que les rayons rouges qui vont se croiser en R. Mais, le célèbre professeur Charles avait coutume, dans ses leçons, de rendre l'expérience plus piquante par l'artifice suivant : on découpe dans une carte, *Fig.* 222, un petit anneau dans l'intérieur duquel il reste un cercle plein, d'un diamètre un peu plus grand que BB′, *Fig.* 221. Cette carte, placée en BB′, arrête toute la lumière, et le tableau plus ou moins éloigné ne reçoit aucune image, ensuite on meut graduellement la carte soit pour l'approcher, soit pour l'éloigner de la lentille, et en la tenant toujours de manière que le centre de l'anneau découpé coïncide avec l'axe du faisceau; alors, dans le premier cas, on voit paraître sur le tableau une large auréole de lumière rouge très-vive, puis une autre auréole jaunâtre, et enfin, une auréole blanche; et, dans le second cas, les auréoles qui se succèdent sont violettes, bleues ou blanches, et toujours très-éclatantes.

543. *Les couleurs naturelles des corps sont en général des couleurs composées.*

Le prisme qui vient de nous servir à décomposer la lumière solaire, peut être employé avec le même succès pour analyser les diverses couleurs naturelles des corps. Les phénomènes qui se présentent alors sont très-variés, mais il nous suffira d'indiquer les conditions sous lesquelles ils se produisent, et le principe qui sert à les expliquer.

1° Au milieu d'une feuille de papier noir, on pose à la suite l'une de l'autre deux petites bandes de papier R et U, l'une rouge et l'autre violette, de 1 ou 2 centimètres de longueur et de 1 millimètre de diamètre, *Fig.* 216; puis on les regarde avec un prisme à quelques pieds de distance en tenant les arêtes du prisme parallèles à la longueur des bandes. On aperçoit alors une image déviée de chaque

bande, mais l'image violette *u* est bien plus relevée vers le sommet du prisme que n'est l'image rouge *r*. Ainsi, le violet est plus réfrangible que le rouge, et c'est par l'inégale refrangibilité que l'on voit au travers du prisme les deux bandes séparées, tandis qu'on les voit unies et sur la même ligne lorsqu'on les regarde directement.

2° Si au lieu de peindre l'une des bandes en rouge et l'autre en violet, on mélange d'abord les deux couleurs ensemble, pour peindre une seule bande P avec la couleur composée, qui est une espèce de pourpre; alors, au travers du prisme, cette bande P donne à elle seule deux images distinctes et séparées *r* et *u*, l'une rouge et l'autre violette. Ainsi, la puissance réfringente du prisme sépare les deux couleurs élémentaires qui composent le pourpre, et dévie chacune de ces couleurs suivant les lois qui lui sont propres, exactement comme si elles provenaient d'un corps lumineux par lui-même.

3° Les corps qui sont naturellement blancs, comme la neige, les fleurs, le papier, etc., ne pouvant tirer leur blancheur que de la lumière qui les éclaire, on peut juger d'avance que leur couleur doit reproduire toutes les nuances du spectre; comme le pourpre de l'expérience précédente a reproduit les nuances élémentaires de rouge et de violet qui entraient dans sa composition.

En effet, une petite bande *b* de papier blanc (*Fig.* 216) éclairée par la lumière des nuées et regardée avec le prisme, ne donne plus aucune trace de couleur blanche dans son image *u r*; mais si elle est assez étroite, elle donne, d'une manière parfaitement distincte, le rouge, l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo et le violet, dans le même ordre et avec les mêmes proportions que la lumière solaire. Si cette même bande *b* était éclairée avec la flamme d'une bougie, elle reproduirait les teintes de la flamme; le jaune s'y trouverait en plus grande proportion.

4° Une large bande de papier blanc, B (*Fig.* 216) pré-

sente d'autres apparences : l'image de la lumière rouge qu'elle envoie se trouvant déviée en rr', celle de la lumière violette en uu', et les couleurs intermédiaires dans des positions intermédiaires, il arrive que dans l'intervalle ur′ toutes les couleurs simples se trouvent superposées et reproduisent du blanc ; mais en même temps la recomposition est incomplète vers les bords, et l'on aperçoit entre u′ et r′ des bandes violettes, indigos, bleues, et entre r et u des bandes rouges, orangées, jaunes. Le vert ne paraît jamais, ni dans les bandes supérieures, ni dans les bandes inférieures, parce que, dans les premières, les couleurs qui manquent pour former du blanc sont successivement : le rouge, le rouge et l'orangé ; le rouge, l'orangé et le jaune, etc. ; qui ont pour couleurs complémentaires le bleu et les nuances qui s'approchent du violet. Tandis que, dans les bandes inférieures, les couleurs qui manquent sont successivement : le violet ; le violet et l'indigo, etc., qui ont pour couleurs complémentaires le jaune et les nuances qui s'approchent de l'orangé et du rouge.

5° Une large bande noire N (*Fig.* 216) sur un fond blanc, présente, au travers du prisme, des phénomènes qui sont précisément l'inverse des précédens ; le milieu u r de l'image u j est noir, et, à partir de ce milieu, les bandes colorées sont successivement rouges, orangées, jaunes, vers le haut ; et violettes, indigos bleues, vers le bas. Pour se rendre compte de cette inversion, il suffit de remarquer que les couleurs résultent de l'espace blanc qui limite la bande noire N ; celles d'en haut proviennent du fond blanc qui est immédiatement au-dessus de N, et celles d'en bas proviennent du fond blanc qui est immédiatement au-dessous.

6° Une bande noire N très-étroite (*Fig.* 216) ne donne plus de noir au milieu ; son image se compose simplement de bandes rouges et violettes, au dehors desquelles se

trouve, d'un côté, l'orangé et le jaune, et de l'autre, l'indigo et le bleu. C'est comme si le milieu noir de l'expérience précédente diminuait de plus en plus au point de disparaître.

7° Les résultats que nous venons d'obtenir avec des bandes rouges, violettes, pourpres, blanches et noires, indiquent d'une manière suffisante ceux que l'on obtiendrait en regardant avec un prisme des taches d'une forme et d'une couleur quelconque, sur un fond qui aurait aussi une couleur donnée; et l'on conçoit combien il est facile d'analyser, par ce moyen, les couleurs naturelles de tous les corps. On peut ainsi passer en revue toutes les couleurs des substances minérales, végétales et animales, et constater que, parmi toutes ces substances, il n'en est pas une qui donne de la lumière simple. Par exemple, les pétales des fleurs dont les couleurs sont les plus éclatantes et les mieux tranchées, donnent toujours des nuances diverses lorsqu'on les dispose sur un fond même très-noir pour les regarder avec un prisme.

La lumière que nous pouvons produire artificiellement, soit par la combustion, soit, en général, par les forces chimiques, soit par les actions physiques ou mécaniques, peut être analysée par le même moyen, et toutes les expériences qui ont été faites sur ce sujet, conduisent jusqu'à présent aux deux conséquences suivantes :

1° La lumière artificielle, quelle que soit son origine, ne contient aucune nuance simple qui ne se retrouve dans la lumière solaire.

2° Il n'existe aucune lumière artificielle qui reproduise les nuances simples de la lumière solaire avec leurs intensités et leurs proportions relatives. La nuance qui domine dans une lumière artificielle est aussi la nuance qui domine dans le spectre que l'on obtient en la regardant avec un prisme. Ainsi, les flammes rouges, jaunes, vertes ou bleues, donnent des spectres où la couleur dominante est

le rouge, le jaune, le vert ou le bleu. Quelques observateurs avaient pensé que le jaune de la flamme du soufre en combustion est un jaune simple, et qu'il en est de même du jaune que l'on obtient en brûlant avec une mèche en éponge de l'alcool très-étendu (Brewster, *Edinburg Transact.*, vol. 9). Mais les expériences plus précises de Frauenhofer, dont nous parlerons dans le chapitre suivant, font découvrir encore plusieurs nuances simples dans ces couleurs artificielles; et en même temps elles donnent le moyen d'établir des caractères distinctifs indépendans de la couleur, soit entre les diverses lumières que nous pouvons produire, soit entre la lumière du soleil et celle des étoiles.

CHAPITRE IV.

Des raies du spectre, de la dispersion et de l'achromatisme.

544. *Des raies du spectre.* Nous appellerons raies du spectre les changemens brusques d'intensité que Frauenhofer a découverts dans la lumière du spectre. Ces changemens se présentent tantôt sous l'apparence de lignes noires ou presque complétement noires, tantôt sous l'apparence de lignes brillantes.

Les *Fig.* 231 et 232 représentent ce phénomène singulier, pour la lumière solaire; la *Fig.* 232 est le spectre ordinaire, où sont marqués les espaces occupés par les diverses couleurs, et la *Fig.* 231 offre les principales raies que l'on y distingue; elles sont toujours noires, et en concevant que cette figure soit projetée sur la première, on aura une idée des positions de ces diverses raies par rapport aux nuances du spectre. On voit d'abord qu'elles ne tombent pas aux limites des couleurs, mais qu'elles se trouvent réparties depuis le rouge au violet avec une grande irrégularité, sans rien offrir de remarquable au passage du rouge à l'orangé, de l'orangé au jaune, etc. On peut remarquer ensuite qu'il n'y a pas moins d'irrégularité dans leur apparence que dans leur position; les unes sont très-déliées et ne paraissent que comme des lignes noires isolées et à peine visibles; d'autres sont très-rapprochées et ressemblent plutôt à une ombre qu'à un assemblage de lignes distinctes; enfin, il y en a quelques-unes qui sont très-tranchées et paraissent avoir une

étendue sensible. Pour établir quelques points de repères au milieu de cette confusion, Frauenhofer a choisi les sept raies qui sont marquées B, C, D, E, F, G, H, comme offrant le double avantage d'être faciles à reconnaître et de partager le spectre en espaces qui ne sont pas trop inégaux. De B à C on compte 9 raies fines et bien déterminées ; de C à D on en compte 30 ; de D à E, environ 84 de différentes grosseurs ; de E à F, plus de 76, entre lesquelles on en distingue trois des plus fortes du spectre et des mieux terminées ; de F à G 185, et de G à H 190 ; ce qui fait 574 de B à H. Si l'on compte encore celles qui sortent de ces limites, on peut évaluer à 6 ou à 700 le nombre total des raies noires, ou plus ou moins sombres que présente le spectre solaire dans toute sa longueur.

Pour observer ce phénomène, il ne suffit pas de jeter les yeux sur le tableau qui reçoit le faisceau de lumière décomposé par le prisme ; ces espaces noirs sont beaucoup trop fins et trop resserrés pour être aperçus directement ; mais il est nécessaire d'employer un appareil particulier, et surtout un grossissement considérable. On peut disposer l'expérience de la manière suivante : on fait entrer dans la chambre noire un pinceau de lumière solaire par une ouverture longue et étroite. A la distance de 6 ou 7 mètres on reçoit ce faisceau sur un prisme très-pur sans stries ni filandres, et tourné de manière que ses arêtes soient parallèles à la longueur de l'ouverture ; derrière ce prisme on dispose une lunette achromatique, pour qu'elle reçoive le faisceau réfracté et décomposé ; et c'est en regardant dans la lunette, successivement toutes les nuances du spectre que l'on distingue les raies qui appartiennent aux diverses portions de sa longueur.

Après avoir fait cette découverte importante, Frauenhofer a constaté 1° que les raies sont tout-à-fait indépendantes de l'angle réfringent du prisme, et 2° qu'elles sont pareillement indépendantes de la nature de la substance

réfringente, c'est-à-dire que, dans tous les cas, elles restent les mêmes pour leur nombre, leur forme et leur disposition.

Jusqu'à présent on a trouvé une identité si absolue entre la lumière du soleil et toutes les autres lumières naturelles ou artificielles, qu'il était très-important de chercher si cette identité se soutiendrait encore à la nouvelle épreuve des raies du spectre. C'est dans cette vue que Frauenhofer a fait avec le même appareil diverses expériences sur l'étincelle électrique, sur la flamme d'une lampe, sur la lumière de Vénus et sur celle de Sirius.

La lumière électrique donne des raies brillantes, au lieu de raies noires; l'une des plus remarquables par sa vive intensité se trouve dans le vert.

La lumière d'une lampe donne pareillement des raies brillantes; on peut surtout en distinguer deux très-intenses vers le rouge et l'orangé. La flamme de l'hydrogène et celle de l'alcool présentent sous ce rapport la même apparence que les flammes d'huile.

La lumière de Vénus donne les mêmes raies que la lumière du soleil; seulement elles sont moins faciles à distinguer vers les extrémités du spectre.

Enfin, la lumière de Sirius donne aussi des raies noires, mais elles sont tout-à-fait différentes de celles du soleil ou des planètes. Il y en a trois surtout qui sont très-remarquables : l'une dans le vert, et deux dans le bleu.

D'autres étoiles de première grandeur paraissent donner des raies différentes de celles de Sirius et de celles du soleil.

Ainsi, par cette nouvelle donnée et par ces observations précises, se trouvent établis des caractères distinctifs entre les diverses lumières naturelles ou artificielles; c'est une vaste carrière ouverte par l'habile artiste de Munich dont nous avons à déplorer la perte. Nous pouvons espérer que les physiciens suivront avec un vif intérêt ces premières

découvertes qui tiennent de si près à l'origine de la lumière et aux conditions sous lesquelles elle prend naissance, soit artificiellement dans les corps terrestres, soit naturellement dans le soleil et les étoiles.

545. *Des indices de réfraction pour divers rayons du spectre.*

La recherche des indices de réfraction des divers rayons de lumière est un problème d'une grande importance pour la théorie de l'optique et pour la construction des instrumens. L'invariabilité des raies du spectre offre, pour le résoudre, un moyen beaucoup plus exact que ceux qu'on pouvait employer quand on n'avait, pour points de repères, que des nuances de couleurs toujours incertaines. Ainsi, au lieu de déterminer pour chaque substance l'indice de réfraction du rouge, de l'orangé, du jaune, etc., on cherche les indices de réfraction des raies que nous avons précédemment appelées B, C, D, E, F, G, H, *Fig.* 231. Les expériences se réduisent toujours à observer l'angle d'incidence sur le prisme, l'angle d'émergence et la déviation; mais on peut aussi simplifier cette recherche en plaçant le prisme comme nous l'avons indiqué (529), de manière qu'il donne successivement pour chaque rayon la déviation *minimum*; alors cette déviation est la seule donnée dont on ait besoin. La lunette qui reçoit le spectre au sortir du prisme est munie d'un fil micrométrique parallèle aux raies, qui permet de remplir la condition du *minimum* avec le dernier degré d'exactitude. Voici le tableau de quelques expériences très-exactes faites par Frauenhofer. Nous avons désigné par N_1, N_2, N_3.... N_7, les indices de réfraction correspondans aux raies B, C, D, E, F, G, H.

Tableau des indices de réfraction des divers rayons du spectre.

SUBSTANCES RÉFRINGENTES.	N_0	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7
Flintglass N° 13	1,627749	1,629681	1,635036	1,642024	1,648260	1,660285	1,671062
Crownglass	1,525832	1,526849	1,529587	1,533005	1,536052	1,541657	1,546566
Eau	1,330935	1,331712	1,333577	1,335851	1,337818	1,341293	1,344177
Eau	1,330977	1,331709	1,333577	1,335849	1,337788	1,341261	1,344162
Potasse	1,399629	1,400515	1,402805	1,405632	1,408082	1,412579	1,416368
Huile de térébenthine	1,470496	1,471530	1,474434	1,478353	1,481736	1,488198	1,493874
Flintglass N° 3	1,602042	1,603800	1,608494	1,614532	1,620012	1,630772	1,640373
Flintglass N° 30	1,623570	1,625477	1,630585	1,637356	1,643466	1,655406	1,666072
Crownglass N° 13	1,524312	1,525299	1,527982	1,531372	1,534337	1,539908	1,544684
Crownglass Litt. M.	1,554774	1,555933	1,559075	1,563150	1,566741	1,573535	1,579470
Flintglass N° 23 et Prisme de 60°	1,626596	1,628469	1,633667	1,640495	1,646756	1,658848	1,669686
Flintglass N° 23 et Prisme de 45°	1,626564	1,628451	1,633666	1,640544	1,646780	1,658849	1,669680

546. *De la dispersion, des rapports de dispersion dans plusieurs substances et des pouvoirs dispersifs.*

En observant avec attention les spectres formés par des prismes de diverses substances, on reconnaît bientôt que les diverses couleurs, quoique rangées toujours dans le même ordre, n'occupent pas cependant des longueurs proportionnelles. Ainsi, un prisme de flint, par exemple, donne proportionnellement moins de rouge et plus de violet qu'un prisme de crown, et il y a d'autres substances qui offrent des différences encore plus frappantes. En général, la même couleur est tantôt plus ou moins resserrée, tantôt plus ou moins développée. Ce phénomène se trouve évidemment lié avec les grandeurs des indices de réfraction correspondans à chaque couleur. Si l'on prend la

différence de ces indices, pour le violet et le rouge, on aura ce que l'on appelle la *dispersion* de la lumière. Une substance est d'autant plus dispersive que pour elle cette différence est plus grande. Ainsi l'on voit, d'après le tableau précédent, que la dispersion de la lumière comprise entre la première et la septième raie se trouve exprimée par les nombres suivans :

Flint N$_o$ 13.	0,043313
Crown N° 9.	0,020734
Eau.	0,013242
Eau.	0,013185
Potasse.	0.016739
Térébenthine..	0,023378
Flint N° 3.	0,038331
Flint N° 30.	0,042502
Crown N° 13.	0,020372
Crown Litt. M.	0,024696
Flint N° 23, prisme 60°. .	0,043090
Flint N° 23, prisme 45°. .	0,043116

L'eau est donc, parmi ces substances, celle qui a la moindre dispersion, et le flint celle qui a la plus grande. C'est ce que l'on peut aisément montrer aux yeux en prenant un prisme d'eau et un prisme de flint dont les angles soient tels, par exemple, que les rayons rouges éprouvent à peu près la même déviation; car on pourra voir alors qu'à la même distance le premier spectre aura beaucoup moins de longueur que le second, ce que l'on peut exprimer encore en disant que, vu du prisme il serait vu sous angle beaucoup plus petit.

Il n'est pas seulement nécessaire de connaître la dispersion totale de chaque substance, mais il importe encore de connaître la dispersion qu'elle exerce sur les divers rayons. Ainsi, pour les rayons compris entre la première et la deuxième raie, les dispersions du flint n° 13, du crown n° 9, et de l'eau sont respectivement 0,001932;

0,001017, 0,000777 ; car ces dispersions sont les différences des indices de réfraction correspondans aux limites de l'intervalle, c'est-à-dire, à la première et à la seconde raie.

Lorsqu'on divise la dispersion partielle ou totale d'une substance par la dispersion correspondante d'une autre substance, on a le *rapport des dispersions*. C'est ainsi que le tableau suivant a été déduit du tableau précédent (page 309). On a accentué au sommet de chaque colonne les indices de réfraction correspondans à la substance la moins dispersive.

Tableau de dispersion partielle de plusieurs substances prises deux à deux.

SUBSTANCES RÉFRINGENTES.	$\frac{N_2-N_1}{N'_2-N'_1}$	$\frac{N_3-N_2}{N'_3-N'_2}$	$\frac{N_4-N_3}{N'_4-N'_3}$	$\frac{N_5-N_4}{N'_5-N'_4}$	$\frac{N_6-N_5}{N'_6-N'_5}$	$\frac{N_7-N_6}{N'_7-N'_6}$
Flintglas N° 13 et Eau	2,562	2,871	3,073	3,193	3,460	3,726
Flintglas N° 13 et Crownglas N° 9	1,900	1,956	2,044	2,047	2,145	2,195
Crownglas N° 9 et Eau	1,349	1,468	1,503	1,560	1,613	1,697
Huile de térébenthine et Eau	1,371	1,557	1,723	1,732	1,860	1,963
Flintglas N° 13 et Huile de térebenthine	1,868	1,844	1,783	1,843	1,861	1,899
Flintglas N° 13 et Kali	2,181	2,388	2,472	2,545	2,674	2,844
Kali et Eau	1,175	1,228	1,243	1,254	1,294	1,310
Huile de téréb. et Kalik	1,167	1,268	1,386	1,381	1,437	1,498
Flintglas N° 3 et Crownglas N° 9	1,729	1,714	1,767	1,808	1,914	1,956
Crownglas N° 13 et Eau	1,309	1,436	1,492	1,518	1,604	1,651
Crowngl. Litt.M. et Eau	1,537	1,682	1,794	1,839	1,956	2,052
Crownglas Litt. M. et Crownglas N° 13	1,174	1,171	1,202	1,211	1,220	1,243
Flintglas N° 13 et Crownglas Litt. M.	1,667	1,704	1,715	1,737	1,770	1,816
Flintglas N° 3 et Crownglas Litt. M.	1,517	1,494	1,482	1,534	1,579	1,618
Flintglas N° 30 et Crownglas N° 13	1,932	1,904	1,997	2,061	2,143	2,233
Flintglas N° 23 et Crownglas N° 13	1,904	1,940	2,022	2,107	2,168	2,268

On voit par ce tableau que les rapports des dispersions partielles des diverses substances sont en général très-différens, et qu'en général ils vont en croissant depuis les intervalles des premières raies jusqu'aux intervalles des dernières. Cependant pour le flint n° 13 et la térébenthine

les rapports sont à très-peu près les mêmes dans toute la longueur du spectre, et pour le flint n° 3 et le crown litt. M, le rapport minimum se trouve compris entre la troisième et la quatrième raie. Il serait très-important de vérifier par l'expérience ce que ces derniers résultats semblent offrir de général.

Le *pouvoir dispersif* d'une substance est le quotient que l'on obtient en divisant sa dispersion par son indice moyen de réfraction diminué de l'unité. On appelle *indice moyen* de réfraction celui qui appartient à la lumière moyenne du spectre. Nous empruntons à l'encyclopédie de M. Brewster, le tableau suivant, qui contient les pouvoirs dispersifs et les dispersions de plusieurs substances; les nombres dont il se compose inspireraient, sans doute, plus de confiance s'ils avaient été obtenus en prenant pour points de repères les raies de Frauenhofer; mais il est antérieur à cette découverte; les dispersions y sont encore exprimées par les différences des indices de réfraction du violet extrême et du rouge extrême, et ces différences ont été divisées par les indices de réfraction du jaune verdâtre pour en former les pouvoirs dispersifs. Or, on ne peut déterminer sans incertitude, ni les limites extrêmes du spectre, ni le rayon que l'on convient de prendre pour rayon moyen dans toutes les expériences. Cependant, comme ce tableau a été dressé par les soins de M. Brewster, et d'après ses propres expériences, on peut compter que l'habileté de l'observateur a suppléé autant qu'il était possible à l'imperfection du procédé.

Tableau des dispersions et des pouvoirs dispersifs de plusieurs substances.

NOMS DES SUBSTANCES.	POUVOIRS dispersifs ou $\frac{N_v - N_r}{N_j - 1}$	DISPERSIONS ou $N_v - N_r$
Chromate de plomb, *maximum* estimé à	0,400	0,770
Chromate de plomb, *id.* doit excéder	0,296	0,570
Réalgar fondu.	0,267	0,394
Chromate de plomb, *minimum*..	0,262	0,388
Réalgar fondu	0,255	0,374
Huile de cassia	0,139	0,089
Soufre après la fusion.	0,130	0,149
Phosphore	0,128	0,156
Sulfure de carbone	0,115	0,077
Baume de tolu	0,103	0,065
Baume du Pérou	0,093	0,058
Carbonate de plomb, *maximum*.	+0,091	+0,091
Aloès des Barbades	0,085	0,058
Huile d'amandes amères	0,079	0,048
Huile d'anis	0,077	0,044
Acétate de plomb fondu.	0,069	0,040
Baume styrax.	0,067	0,039
Gayac	0,066	0,041
Carbonate de plomb, *minimum* .	0,066	0,056
Huile de cumin.	0,065	0,033
Huile essentielle de tabac	0,064	0,035
Gomme ammoniaque	0,063	0,037
Huile de goudron des Barbades.	0,062	0,032
Huile de girofle	0,062	0,033
Verre vert.	0,061	0,037
Sulfate de plomb	0,060	0,056
Verre rouge foncé	0,060	0,044
Huile de sassafras.	0,060	0,032
Hydrochlorate d'antimoine . . .	0,059	0,036
Verre opale	0,060	0,038
Résine	0,057	0,032
Huile de fenouil	0,055	0,028
Huile de menthe sauvage	0,054	0,026
Verre orangé.	0,053	0,042

NOMS DES SUBSTANCES.	POUVOIRS dispersifs ou $\frac{N_A - N_r}{N_j - 1}$	DISPERSIONS ou $N_v - N_r$
Sel gemme.	0,053	0,029
Caoutchouc.	0,052	0,028
Huile de piment	0,052	0,026
Flintglas.	0,052	0,032
Verre pourpre foncé	0,051	0,031
Huile d'angélique.	0,051	0,025
Huile de thym..	0,050	0,024
Huile de fénugrec	0,050	0,024
Huile de d'absinthe.	0,049	0,022
Huile de pouillot	0,049	0,024
Huile de carvi	0,049	0,024
Huile de dill?	0,049	0,023
Huile de bergamote.	0,049	0,023
Flinglas	0,048	0,029
Térébenthine de Chio.	0,048	0,028
Encens.	0,048	0,028
Huile de limon	0,048	0,023
Flinglas	0,048	0,028
Huile de genièvre.	0,047	0,022
Huile de camomille	0,046	0,021
Gomme de genièvre.	0,046	0,025
Carbonate de strontianne, *maximum*.	0,046	0,032
Huile de brick (*oil of brick*). . .	0,046	0,021
Acide nitrique	0,045	0,019
Huile de lavande	0,045	0,021
Baume de soufre.	0,045	0,023
Ecaille de tortue	0,045	0,027
Corne.	0,045	0,025
Baume du Canada	0,045	0,024
Huile de marjolaine.	0,045	0,022
Gomme oliban	0,045	0,024
Acide nitreux.	0,044	0,018
Huile de cajeput	0,044	0,021
Huile d'hysope.	0,044	0,022
Huile de bois de Rhodes.	0,044	0,022
Verre-rose	0,044	0,025
Huile de sabine.	0,044	0,021
Huile de pavot	0,044	0,020
Zircon, *maximum*	0,044	0,045

NOMS DES SUBSTANCES.	POUVOIRS dispersifs ou $\frac{N_v - N_r}{N - 1}$	DISPERSIONS ou $N_v - N_r$
Acide muriatique	0,043	0,016
Copal	0,043	0,024
Huile de noix	0,043	0,022
Poix de Bourgogne	0,033	0,024
Huile de térébenthine	0,042	0,020
Huile de romarin	0,042	0,020
Feldspath	0,042	0,022
Glue	0,041	0,022
Baume de copahu	0,041	0,021
Ambre	0,041	0,023
Huile de muscades	0,041	0,021
Stilbile	0,041	0,021
Huile de menthe poivrée	0,040	0,019
Rubis spinelle	0,040	0,031
Spath calcaire, *maximum*	0,040	0,027
Huile de colza	0,040	0,019
Verre de bouteilles	0,040	0,023
Tartrate de potasse et de soude	0,039	0,020
Gomme élémi	0,039	0,021
Sulfate de fer	0,039	0,019
Diamant	0,038	0,056
Huile d'olives	0,038	0,018
Gomme mastic	0,038	0,022
Blanc d'œuf	0,037	0,013
Huile de rhue	0,037	0,016
Gomme myrrhe	0,037	0,020
Béril	0,037	0,022
Obsidienne	0,037	0,018
Éther	0,037	0,012
Sélénite	0,037	0,020
Alun	0,036	0,017
Huile de riccin	0,036	0,018
Sulfate de cuivre	0,036	0,019
Crown très-vert	0,036	0,020
Gomme arabique	0,036	0,018
Sucre apres la fusion et refroidi	0,036	0,020
Colle de poisson	0,035	0,013
Eau	0,035	0,012
Humeur aqueuse de l'œil d'un poisson	0,035	0.012

NOMS DES SUBSTANCES.	POUVOIRS dispersifs ou $\frac{N_v - N_r}{N_j - 1}$	DISPERSIONS ou $N_v - N_r$
Humeur vitrée du même. . . .	0,035	0,012
Acide citrique.	0,035	0,019
Rubellite.	0,035	0,027
Leucite.	0,035	0,018
Épidote.	0,035	0,024
Verre de borax.	0,034	0,018
Grenat.	0,033	0,027
Pyrope.	0,033	0,026
Chrysolite.	0,033	0,022
Crown.	0,033	0,018
Huile d'ambre gris.	0,032	0,012
Huile de vin.	0,032	0,012
Acide phosphorique solide. . . .	0,032	0,017
Verre de phosphore.	0,03157	0,017
Verre à vitres.	0,032	0,017
Acide sulfurique.	0,031	0,014
Acide tartrique.	0,030	0,016
Nitre, *minimum*.	0,03040	0,009
Borax.	0,030	0,014
Axinite.	0,030	0.022
Alcool.	0,029	0,011
Sulfate de baryte.	0,029	0,011
Tourmaline.	0,028	0,019
Acide phosphorique liquide. . .	0,0283	0,012
Carbonate de baryte, *minimum*. .	0,0285	0,015
Carbonate de strontiane, *minimum*	0,027	0,015
Cristal de roche.	0,026	0,014
Émeraude.	0,026	0,015
Verre de borax.	0,026	0,014
Spath calcaire, *minimum*. . . .	0,026	0,016
Saphir bleu.	0,026	0,021
Topase bleue de Caimgorm . . .	0,025	0,016
Chrysobéril.	0,025	0,019
Topase bleue d'Aberdeenshire. . .	0,024	0,016
Sulfate de strontiane.	0,024	0,015
Acide prussique.	0,0227	9,080
Acide malique.	0,0282	0,011
Spath fluor.	0,022	0,010
Cryolite	0,022	0,007

Un des résultats les plus remarquables que présente ce tableau est la différence des pouvoirs dispersifs pour les faisceaux ordinaires et extraordinaires, dans les substances douées de la double réfraction, comme le chromate de plomb, le carbonate de chaux, le cristal de roche, etc.

547. *De l'achromatisme.* On dit que des prismes sont *achromatiques* quand ils ont la propriété de dévier la lumière sans y développer de couleurs, et l'on dit pareillement que des lentilles sont achromatiques quand elles forment en leurs foyers des images incolores des objets. On a cru pendant long-temps que l'*achromatisme* était impossible, c'est-à-dire, que la lumière ne pouvait pas être déviée sans être décomposée : c'est Newton lui-même qui avait été conduit à cette conséquence, dont l'inexactitude ne fut constatée qu'après bien des années, et par de longs débats entre les plus grands géomètres, tels que Euler, Clairaut et d'Alembert. A la vérité, Hall avait construit dès 1733 de véritables lunettes achromatiques qu'il conservait sans publier son invention, et Jean Dollond avait fait la même découverte en 1757, et l'avait rendue publique ; mais il faut toujours distinguer un fait particulier d'une théorie générale. La découverte de Dollond fut sans doute un grand événement pour l'astronomie ; mais pour lui donner toute son importance il fallait la développer par le calcul et déterminer les conditions sans lesquelles la pratique la plus ingénieuse ne pouvait tenter les perfectionnemens nécessaires. Présentement, après tous les progrès que l'on a faits, soit en optique, soit dans l'art de travailler les verres, et avec toutes les ressources que le calcul fournit aux physiciens, la question de l'achromatisme est encore l'une des plus délicates et des plus embarrassantes, tant pour la théorie que pour la pratique. Nous devons seulement nous proposer ici de faire comprendre les principes sur lesquels repose la construction des prismes et des lentilles achromatiques.

On démontre par le calcul qu'un rayon de lumière simple éprouve, en traversant un nombre quelconque de prismes, une déviation D qui est exprimée par la formule suivante :

$$D = (N - 1)G + (N' - 1)G' + (N'' - 1)G'', \text{ etc.}$$

G, G', G'', etc., sont les angles réfringens des prismes, et N, N', N'', les indices de réfraction du rayon simple dont il s'agit, dans la substance de chacun des prismes G, G', etc.

Si les angles réfringens de tous les prismes sont tournés dans le même sens, tous les termes doivent être pris avec le même signe, comme ils sont écrits dans la formule.

Si quelques-uns des prismes ont leurs angles réfringens tournés en sens contraire, les termes correspondans de la formule doivent être pris avec le signe moins.

Ainsi, pour le cas de deux prismes, qui est le seul que nous ayons besoin de discuter ici, on aura, suivant que les angles seront tournés dans le même sens ou en sens opposé,

$$D = (N - 1)G + (N' - 1)G' ; \textit{Fig.}\ 223.$$

$$\text{ou } D = (N - 1)G - (N' - 1)G' ; \textit{Fig.}\ 224.$$

Au moyen de cette dernière formule, on peut facilement déterminer quel doit être le rapport des angles réfringens de deux prismes dont la substance est connue, pour que leur ensemble n'imprime aucune déviation à un rayon d'une réfrangibilité donnée. Car, la déviation étant nulle, on a

$$(N - 1)G = (N' - 1)G'$$

$$\text{d'où. . . . . } G = G'\left(\frac{N' - 1}{N - 1}\right)$$

Supposons, par exemple, que la substance du prisme G' soit du crown n° 9 (tableau de la page 309), et le prisme G du flint n° 13 ; l'indice de réfraction du premier

pour les rayons de la première raie est $N' = 1{,}525832$, et celui du second pour les mêmes rayons est $N = 1{,}627749$; il en résulte,

$$G = G'.\ 0{,}8376;$$

c'est-à-dire, que l'angle du prisme de flint doit être seulement les 83 ou les 84 centièmes de l'angle du prisme de crown; celui-ci étant, par exemple, de 25°, le premier doit être de 20° 56′ 28″.

Si l'on voulait que les rayons de la septième raie fussent sans déviation, il faudrait prendre pour N et N' les indices de réfraction correspondans à ces rayons, savoir : $N' = 1{,}546566$, $N = 1{,}671062$, et l'on en déduirait

$$G = G'.\ 0{,}8145.$$

Par conséquent, pour $G' = 25°$, on aurait $G = 20° 21' 43''$.

Ainsi, en supposant (*Fig.* 226) un prisme de crown CSC' de 25°, et derrière lui un prisme de flint $FS'F'$ de 20° 21′ 43″, le rayon blanc qui tomberait sur ce système dans la direction LI serait décomposé et sortirait dans une direction telle que le rayon violet $I'V$ de la septième raie serait parallèle au rayon incident, et le rayon rouge $I''R$ de la première serait incliné vers la base du prisme de crown, puisqu'il ne devient parallèle au rayon incident que pour un prisme de flint de 20° 56′ 28″. Or, si le prisme de flint n'y était pas, on aurait un spectre en $R'V'$ dans lequel V' serait au-dessous de R'. En supposant donc que l'angle du prisme de flint augmente graduellement depuis 0 à 20° 21′ 43″, il doit y avoir un angle pour lequel les rayons de la première et de la septième raie sortent parallèles entre eux, puisqu'en passant de $R'V'$ en RV, ils changent de position relative; cet angle est celui de l'achromatisme.

Après avoir demontré qu'il y a un angle qui donne l'achromatisme, il est facile d'en trouver la valeur; car

les déviations D_1 et D_7 des rayons de la première et de la septième raie étant égales entre elles, et étant données par les équations,

$$D_1 = (N_1 - 1)\,G - (N_1' - 1)\,G'$$

$$D_7 = (N^7 - 1)\,G - (N'^7 = 1)\,G'$$

on a

$$(N - 1)\,G - (N'_1 - 1)\,G' = (N^7 - 1)\,G - (N'_7 - 1)\,G'$$

$$\text{d'où } G = G' \frac{(N'_7 - N'_1)}{N_7 - N^1}$$

Et, d'après les valeurs précédentes de N et N' pour la première et la septième raie, il en résulte

$$G = G'.\ 0{,}4787$$

et puisque $G' = 25°$, on a $G = 11°\ 58'\ 3''$.

Ainsi, un système composé d'un prisme de crown n° 9 de 25° et d'un prisme de flint n° 13, de 11° 58′ 3″, est un système achromatique que les faisceaux blancs traversent sans que leurs rayons de la première et de la septième raie soient séparés. Cependant ces faisceaux éprouvent une déviation de 5° 27′ 58″, comme il est facile de s'en assurer en mettant pour G et G′ leurs valeurs, et pour N et N′ leurs valeurs N_1 et N'^1 dans l'équation qui donne D'^1 ou leurs valeurs N_7 et N'_7 dans celle qui donne D_7.

C'est ainsi que l'on peut, dans tous les cas, déterminer les rapports des angles que doivent avoir deux prismes, pour que deux rayons d'une réfrangibilité connue reprennent leur parallélisme entre eux après les avoir traversés.

Cependant il faut remarquer que l'achromatisme déterminé par ces conditions est d'autant plus incomplet, que les rapports des dispersions partielles des deux substances sont plus variables. Si ces rapports étaient les mêmes, les valeurs de G déterminées par l'équation précédente

$$G = \frac{G'(N'_7 - N'_1)}{N_7 - N_1}$$

deviendraient les mêmes pour toutes les couleurs, et l'achromatisme serait alors parfait. C'est ce qui arriverait, par exemple, avec des prismes de flint n° 13, et de térébenthine, comme on peut le voir dans le tableau de la page 306. Mais ces rapports étant, en général, variables d'une couleur à l'autre, il en résulte que la valeur de G, qui convient pour accorder deux couleurs, même les couleurs extrêmes, n'est pas celle qui convient pour accorder les nuances intermédiaires. Dans ce cas, de quelque manière que l'on s'y prenne, l'achromatisme est imparfait; pour y remédier plus complétement, on peut alors employer trois ou quatre prismes de diverses substances. Car, il est facile de voir par la formule générale (page 313) que l'on peut faire sortir parallèlement autant de rayons de réfrangibilité différente que l'on emploie de prismes.

L'achromatisme des lentilles se détermine par les mêmes principes. Nous avons vu (535) que la distance focale principale d'une lentille est donnée par la formule

$$F = \frac{R\,R'}{(N-1)(R'-R)}$$

Supposons qu'après avoir fait une lentille convergente de crown, on se propose de déterminer les courbures d'une lentille de flint, par la condition que les rayons de la première et de la septième raie fassent leurs images à la même distance après avoir traversé le système. Admettons, pour plus de simplicité, que la lentille de crown soit biconvexe, avec ses deux rayons égaux, et que la lentille de flint ait aussi le même rayon de courbure du côté où elle touche celle de crown (*Fig.* 227); il restera à trouver le rayon de courbure de la seconde face de la lentille de flint. Soit F' sa distance focale principale, pour les rayons de la première raie, et K, le point où concourraient les

rayons parallèles de cette espèce, s'ils étaient modifiés seulement par la lentille de crown ; il est évident que, par l'effet de la lentille de flint, ils iront converger en un point plus éloigné, par exemple, au point M ; et réciproquement si l'on mettait en M un point lumineux, les rayons de la première raie qu'il émettrait se trouveraient dirigés, après avoir traversé la lentille de flint, de manière à ce que leur prolongement passât au point K ; on a donc entre ces deux distances AK = F et AM = B, la relation

$$\frac{1}{F^1} = \frac{1}{F^{1\prime}} + \frac{1}{B}$$

F_1 étant la distance focale principale de la lentille de crown, pour les rayons de la première raie, et F'_1 celle de la lentille de flint pour les mêmes rayons.

Or, par la condition que nous voulons remplir, la valeur inconnue de B devant être la même pour les rayons de la septième raie et pour ceux de la première, on aura pareillement pour ces derniers

$$\frac{1}{F_7} = \frac{1}{F_7'} + \frac{1}{B}$$

F_7 et F'_7 désignant les distances focales principales de la lentille de crown et de celle de flint, pour les rayons de la septième raie. Il en résulte

$$\frac{1}{F^1} - \frac{1}{F_7} = \frac{1}{F_1'} - \frac{1}{F_7'}$$

D'ailleurs pour la lentille de crown, dont les rayons sont égaux, on a en général

$$F = \frac{R}{2(N-1)}$$

et par conséquent

$$F_1 = \frac{R}{2(N_1-1)} \text{ et } F_7 = \frac{R}{2(N_7-1)}$$

d'où il résulte

$$\frac{1}{F_1} - \frac{1}{F_7} = \frac{2(N^I - N_7)}{R.}$$

Pour la lentille de flint, dont les rayons R et R′ sont inégaux, on a

$$\frac{1}{F_1'} - \frac{1}{F_7'} = \frac{(R' - R)(N'_1 - N'_7)}{R R'}$$

d'où il résulte enfin

$$R = \frac{R(N'_7 - N'_1)}{N'_7 - N'_1 - 2(N_7 - N_1)}$$

et d'après les valeurs précédentes de N_1, N_7, N_1', N_7'

$$R' = 23{,}47\ R.$$

c'est-à-dire que le rayon R′ doit être plus que vingt fois le rayon R.

Si l'on suppose, par exemple, $R = 1^m$, on aura : $R' = 23^m{,}47$, et la valeur de B, ou la distance focale principale de cette lentille composée devient alors facile à calculer ; on trouve $B = 2^m{,}22$.

Mais la coïncidence des rayons extrêmes ne détermine pas celle des rayons intermédiaires, et, pour que l'achromatisme soit parfait, il faut pour les lentilles, comme pour les prismes, que les dispersions partielles conservent entre elles le même rapport dans toute la longueur du spectre. Au reste, le calcul des objectifs des lunettes présente une difficulté de plus dans le détail de laquelle nous ne pouvons entrer ici ; c'est le compte que l'on doit tenir de l'aberration de sphéricité.

CHAPITRE V.

De la vision et des instrumens d'optique.

VISION.

548. *Structure de l'œil.* La forme extérieure de l'œil est à peu près celle de deux segmens sphériques de différens rayons, réunis par leur base (*Fig.* 228). Le rayon du plus grand segment sns′ est d'environ 10 millimètres, et celui du plus petit scs′ de 7 à 8 millimètres seulement; c'est celui-ci qui offre au dehors la partie diaphane et saillante de l'œil. Cette forme régulière est déterminée et maintenue par une membrane épaisse et fibreuse, d'un tissu ferme et serré, que l'on nomme la *sclérotique*, lorsqu'on la considère dans son ensemble comme enveloppe externe de l'organe; mais on la nomme *cornée transparente* dans sa partie antérieure et diaphane scs′, et *cornée opaque* dans ses parties sb et s′b′, qui forment le *blanc* de l'œil, et dans toute sa partie postérieure bnb′. Aux points s et s′, où la cornée opaque devient transparente, se trouve tendue, dans l'intérieur de l'œil, la membrane de l'*iris* ss′, ayant comme on sait la forme d'un plan circulaire, dont l'intérieur est percé d'un trou rond plus ou moins ouvert, et parfaitement noir, que l'on nomme la *pupille*. C'est l'iris qui donne à l'œil sa couleur; s'il était transparent comme la cornée, l'œil serait noir comme la pupille, et la vision ne pourrait s'accomplir; il est donc essentiellement opaque, et cette condition est remplie par des enduits diversement colorés, dont il est revêtu. Derrière l'iris se trouve suspendu le *cristallin* cc′; il est enfermé

dans une membrane particulière que l'on nomme la *capsule cristalline*, et qui va s'attacher à la cornée par tous les points de son contour. Cette capsule forme une cloison continue qui sépare l'œil en deux parties ou en deux *chambres;* le liquide qui remplit la *première chambre* ou la chambre antérieure se nomme l'*humeur aqueuse*, et celui qui remplit la *seconde chambre* se nomme *humeur vitrée*, parce qu'il a en quelque sorte l'apparence du verre fondu. Les humeurs de l'œil sont enveloppées d'une membrane particulière, comme tous les autres liquides contenus en repos dans des cavités organiques; celle qui enveloppe l'humeur aqueuse se nomme simplement *membrane de l'humeur aqueuse*; celle de l'humeur vitrée se nomme *hyaloïde*. Un grand nombre de ses replis pénètrent dans l'humeur elle-même, et forment en la traversant des mailles ou des cloisons dont on ne connaît pas l'usage.

Entre l'hyaloïde et la sclérotique, se trouvent encore deux autres membranes, la choroïde et la rétine, qui jouent dans le phénomène de la vision le rôle le plus important.

La *choroïde* est une membrane vasculaire qui revêt toute la face interne de la sclérotique, depuis le fond de l'œil jusqu'à la capsule cristalline; il y a même quelques anatomistes qui prétendent qu'elle se prolonge en avant pour venir former l'iris, en se repliant sur elle-même.

La *rétine* n'est autre chose que l'épanouissement du nerf optique; elle est simplement posée sur la choroïde, et s'en détache avec la plus grande facilité lorsque l'on coupe l'œil pour en faire l'anatomie. Cette membrane, ou plutôt ce lascis nerveux, offre une transparence presque complète.

Telle est à peu près la disposition générale des principales pièces qui composent l'organe de la vue. Les dimensions moyennes d'un œil humain sont ainsi qu'il suit :

Rayon de courbure de la sclérotique	10	à 11	millimètres.
id. de la cornée transp.	7	à 8	
Diamètre de l'iris.	11	à 12	
id. de la pupille.	3	à 7	
Épaisseur de la cornée transp. . . .	1		
Distance de la pupille à la cornée..	2		
Distance de la pupille au cristallin.	1		
Rayon antérieur du cristallin. . . .	7	à 10	
Rayon postérieur id. . . .	5	à 6	
Diamètre du cristallin.	10		
Épaisseur id.	5		
Longueur de l'axe de l'œil.	22	à 24	

Nous allons examiner maintenant, d'après ces données, les modifications qu'éprouve la lumière en traversant les divers milieux qui composent l'œil.

Lorsqu'un point lumineux est placé à 8 ou 10 pouces au-devant de l'œil sur l'axe du cristallin, une partie du faisceau qu'il envoie tombe sur le blanc de l'œil, et se trouve irrégulièrement réfléchie dans tous les sens; une partie plus centrale tombe sur la cornée transparente, pénètre dans l'humeur aqueuse en se réfractant, et ses bords extérieurs viennent éclairer le contour de l'iris, tandis que la partie tout-à-fait centrale passe par l'ouverture de la pupille, traverse le cristallin, l'humeur aqueuse, la rétine elle-même, et va tomber sur la choroïde. La lumière que reçoit l'iris est irrégulièrement réfléchie dans tous les sens, et va reporter au-dehors la forme et la couleur de cette membrane. Le faisceau central qui traverse la pupille se trouve réfracté par le cristallin, comme il le serait par une lentille convergente; car le cristallin est plus réfringent que l'humeur aqueuse, et plus aussi que l'humeur vitrée; par conséquent, sous certaines conditions, ce faisceau, devenu convergent, doit former quelque part une image du point lumineux d'où il est émané. Supposons pour un moment qu'il forme cette image exacte-

ment sur la rétine ou sur la choroïde en M; alors, il est évident qu'un autre point lumineux L′ fera une image pareille en M′, et qu'ainsi on aura au fond de l'œil une petite image MM′ de l'objet LL′. Cette image sera renversée, et présentera d'ailleurs toutes les nuances, tous les accidens de lumière et tous les contours de l'objet lui-même.

C'est ce que l'on peut vérifier par l'expérience, en fermant le trou du volet d'une chambre noire par un œil de bœuf ou de mouton fraîchement préparé, et aminci à sa partie postérieure au point d'offrir une enveloppe translucide; l'observateur, placé dans la chambre noire, voit alors assez distinctement, sur le fond de l'œil soumis à l'expérience, l'image de la flamme d'une bougie ou d'un corps vivement éclairé; et l'on ne peut douter que les images du monde extérieur, si fidèlement tracées sur la choroïde, ne soient, dans l'état de vie, la première condition de la vision.

Ainsi, considéré d'une manière générale, le phénomène physique de la vision paraît être un résultat très-simple des lois de la réfraction et du pouvoir des lentilles; mais lorsqu'on examine de plus près toutes les circonstances qui accompagnent la formation des images sur la choroïde, on rencontre des difficultés dont jusqu'à présent la science n'a pu rendre compte d'une manière satisfaisante. Parmi ces difficultés, qui sont nombreuses, les plus remarquables sont les deux suivantes:

1° L'œil est un instrument parfaitement achromatique, car les objets ne nous paraissent point environnés d'auréoles de diverses couleurs.

2° La netteté des images semble être indépendante de la distance des objets; car nous voyons nettement à quelques pouces de distance, et nous voyons nettement encore à quelques pieds, à quelques toises, à quelques lieues même, et jusqu'à plusieurs millions de lieues; l'image

d'une étoile est aussi nette que celle d'une étincelle que nous avons sous les yeux.

Pour résoudre la première difficulté, il faudrait connaître exactement les indices de réfraction, les puissances dispersives, et les courbures de tous les milieux que la lumière traverse depuis la cornée jusqu'à la rétine ; question d'autant plus compliquée et plus difficile, que les diverses parties du cristallin ont des réfractions et des puissances dispersives différentes. Cependant, sur ce point, on peut consulter avec intérêt les mémoires de M. Chossat. (*Ann. de phys. et de chim.*)

Pour résoudre la seconde, on a eu recours à diverses hypothèses que nous ne devons pas discuter ici, mais dont il est utile d'indiquer au moins la substance.

549. *Hypothèses par lesquelles on a essayé d'expliquer comment l'œil s'accommode aux distances.* Pour qu'un objet fasse son image au foyer principal d'une lentille, il faut que sa distance soit très-grande par rapport à la distance focale principale de cette lentille; par exemple, une centaine de fois (535). S'il s'éloigne plus, l'image reste sensiblement au même lieu avec la même netteté, seulement elle diminue de grandeur; mais s'il se rapproche, l'image recule rapidement, de telle sorte que sa distance est doublée quand l'objet est parvenu, au-devant de la lentille, à une distance double de la distance focale principale. Or, puisque nous voyons nettement à 6 pouces et à toutes les distances plus grandes, il faut nécessairement, ou que la distance de 6 pouces soit très-grande par rapport à la distance focale principale de l'œil, ou que l'ensemble de l'organe ait la propriété de s'accommoder à la distance, c'est-à-dire de se changer, suivant le besoin, en lentille plus forte ou plus faible. Le premier cas n'est pas celui que nous présente la nature dans l'œil de l'homme ; c'est ce qui est évident d'après ses dimensions et ce que l'on peut vérifier aussi par l'expérience suivante :

Sur un verre mince et transparent, on fait une petite tache, et on la présente devant l'œil à 6, 8 ou 10 pouces de distance; alors, lorsqu'on regarde cette tache, on ne voit qu'une image confuse des objets qui sont au-delà du verre; et réciproquement, lorsque, sans déranger l'œil, on regarde ces objets plus éloignés, on ne voit plus qu'une image confuse de la tache. Donc les objets qui sont à 10 pouces et ceux qui sont plus loin, ne forment pas leurs images en même temps et avec la même netteté sur le fond de l'œil, car on les verrait à la fois distinctement et sans confusion. Par conséquent l'œil s'accommode par un acte de la volonté, tantôt pour voir près, tantôt pour voir loin; et en effet, on a le sentiment d'une modification différente pour chacune des distances auxquelles on regarde. En observant sur quelle partie de l'organe cette modification s'exerce, on peut s'assurer que le diamètre de la pupille change avec la distance; elle se rétrécit toujours quand on regarde plus près, et s'agrandit toujours lorsqu'on regarde plus loin. Quelques personnes peuvent même produire à volonté ces changemens, et alors elles voient les mêmes objets nettement ou avec confusion, suivant qu'elles tiennent la pupille plus ouverte ou plus resserrée.

Pour expliquer cette propriété par laquelle l'œil s'accomode aux distances, on a proposé un grand nombre d'hypothèses.

Kepler avait supposé que l'œil s'allonge suivant son axe à mesure que l'objet se rapproche.

Le docteur Jurin avait émis une autre hypothèse, qui fut accueillie par Moulin, Home, Ramsden, et plusieurs observateurs connus par leur exactitude; il pensait que la cornée seule change de forme et de courbure, et qu'elle devient plus convexe quand l'œil s'ajuste pour voir à des distances plus petites.

Descartes, Pemberton, Albinus, Hunter et Olbers ont essayé de démontrer que le cristallin est composé de fibres

musculaires, et qu'il peut changer de courbure en se dilatant ou en se contractant. Le Dr Young avait adopté cette opinion.

Porterfield soutenait que le cristallin peut éprouver un mouvement de translation; qu'il est poussé en avant pour regarder près, et reculé pour regarder loin.

La Hire et le Roy pensaient que la mobilité de la pupille suffit seule pour expliquer le phénomène.

Après toutes ces hypothèses, il est vrai de dire que les physiciens ne savent encore à quoi s'en tenir. Ils s'accordent seulement à les rejeter toutes ou comme fausses ou comme incomplètes. Ainsi, il paraît bien certain que l'œil ne s'allonge pas, et que la cornée ne change pas de courbure; le mouvement du cristallin paraît impossible, et sa contraction très-peu probable.

En m'occupant de quelques recherches sur ce sujet, j'ai été conduit à une remarque qui me semble importante. La dissection d'un grand nombre de cristallins m'a fait voir que ce corps n'est pas composé de couches concentriques comme on le suppose; mais de couches inégales en courbure et en épaisseur, comme on le voit dans les figures 229 et 230. Cette dernière figure représente un cristallin dans lequel une des moitiés seulement a été disséquée. Il en résulte que les couches centrales étant tout à la fois plus courbes et plus réfringentes que celles des bords, les rayons qui traversent ces dernières ne peuvent pas converger au même point que ceux qui ont traversé les premières. Le faisceau central c c' converge plus près, et le faisceau des bords B B' va converger plus loin. Ainsi le cristallin n'est pas une lentille à un seul foyer, mais une lentille à un nombre infini de foyers différens. Ce fait me semble constant; sans essayer ici de le développer dans tous ses détails, j'essaierai d'indiquer comment il peut concourir à l'explication des phénomènes. D'abord si l'on place au-devant de l'œil une lame opaque, percée d'un trou,

dont le diamètre soit moindre que 1 millimètre, on distingue nettement tous les objets jusqu'à des distances beaucoup plus petites qu'on ne le pourrait faire sans cette précaution ; c'est qu'alors le faisceau qui pénètre dans l'œil est si mince qu'il est à peine nécessaire qu'il soit aminci davantage par la convergence pour faire des images nettes. Aussi n'observe-t-on aucune différence lorsque le petit trou coïncide avec le bord ou avec le centre de la pupille. Avec un faisceau mince on peut donc voir nettement à toutes les distances et par toutes les zônes du cristallin.

Quand on veut regarder à la vue simple et sans diaphragme un objet de plus en plus rapproché, on rétrécit de plus en plus l'ouverture de la pupille ; c'est un fait facile à vérifier. Le but de ce rétrécissement est en effet d'arrêter les rayons qui tomberaient trop loin du centre du cristallin, et dont la convergence ne pourrait avoir lieu qu'au-delà de la rétine.

Quand on veut regarder au loin, on ouvre, au contraire, la pupille autant qu'il est possible, afin que le faisceau incident soit large, et que ses bords extérieurs tombent près des bords du cristallin, pour converger ensuite sur la rétine. Alors, il est vrai, la partie centrale du faisceau converge trop tôt, mais l'épanouissement qu'elle peut prendre en allant depuis son point de convergence jusqu'à la rétine, est toujours très-petit, et peut d'autant moins troubler la vision, que l'éclat de sa lumière est toujours très-faible par rapport à l'éclat de la lumière des bords.

550. *Jugement sur la couleur, la forme, la situation, et la grandeur des objets.*

Nous distinguons les *couleurs* comme nous distinguons les sons, sans le secours du toucher ; mais nous ne les distinguons pas de prime abord sans exercice ni sans comparaisons. Il faut des expériences souvent répétées pour reconnaître que le rouge, le jaune et le bleu, par exemple, ne font pas la même impression sur nous ; comme il faut

des expériences souvent répétées pour reconnaître une différence entre les sons graves et les sons aigus. Nous voyons la lumière avant de savoir démêler les couleurs ; comme nous entendons du bruit avant de savoir démêler les sons. Ce résultat, qui semble bien naturel, se trouve confirmé par les observations que l'on a faites sur les aveugles de naissance, auxquels on est parvenu à rendre la vue dans un âge plus ou moins avancé.

Les images tracées sur la rétine sont pour la couleur, le contour et la forme, une représentation fidèle des objets ; il suffit donc, pour que nous puissions prendre *directement* une idée de la forme des corps, que nous puissions distinguer les points de la rétine qui sont en repos et ceux qui sont affectés ou ébranlés par la lumière. Or, il n'y a pas un des points de notre enveloppe extérieure sur lequel cette distinction ne soit facile. Une piqûre au bras se distingue d'une piqûre au doigt, et nous pourrions, sans doute, avec le bras comme avec la paume de la main, saisir la différence qu'il y a entre un cercle et un carré. Par conséquent, il n'y a pas de raison pour que cette différence ne puisse être saisie avec plus de netteté encore, et plus de précision, sur la membrane de la rétine. Les objets donnent au fond de l'œil des *images renversées*, et de là on a voulu conclure que naturellement nous devons voir les *objets renversés*. Cette conclusion serait légitime si l'on supposait que l'âme *regarde* les images, et qu'elle est placée derrière l'œil, comme une personne derrière le tableau d'une chambre noire. Mais si l'on suppose que l'âme ne regarde pas les images, qu'elle les sent, et qu'elle s'élève de la sensation à la cause qui la produit, il est évident que l'existence extérieure des corps et leur situation résultent pour nous d'un seul et même jugement. Il paraît toutefois que le sens de la vue seul ne pourrait pas plus nous conduire à la connaissance du monde extérieur que le sens de l'ouïe ; tout semble indiquer que sur ce point le sens du

toucher nous fournit des données indispensables, et qu'il ne peut être suppléé par aucun autre sens.

L'extériorité des objets une fois constatée, leur *distance* peut être appréciée de plusieurs manières. 1° Le cône lumineux qui tombe sur la pupille est d'autant plus divergent que le point qui l'envoie est plus rapproché de l'œil, et, d'après ce que nous avons vu, il faut que l'œil s'ajuste à ces diverses distances, pour faire tomber sur la rétine une image suffisamment nette. La conscience que nous avons de cet ajustement ou de cette modification de l'œil, devient, par l'habitude, la donnée d'après laquelle nous portons notre jugement sur la distance. De plus, lorsque nous regardons avec les deux yeux, nous devons donner à leur axe optique une inclinaison relative d'autant plus grande que l'objet est plus rapproché : nous avons pareillement conscience de cette inclinaison ; c'est une seconde indication qui vient au secours de la première et qui donne en général beaucoup plus de justesse à nos jugemens ; car, il est facile de se tromper quand on juge avec un œil, à moins de s'y être exercé.

On appelle *distance* de la *vision distincte* la distance à laquelle nous voyons nettement et sans effort divers objets, tels, par exemple, qu'une page imprimée en caractères ordinaires. Cette distance est d'environ 10 pouces pour les vues moyennes, elle est de plusieurs pieds pour les vues presbytes, et seulement de quelques pouces pour les myopes. Au reste, elle varie avec les dimensions des objets ; des lettres très-fines, par exemple, et des lettres de moyenne grandeur ne peuvent être distinguées à la même distance.

Lorsque les objets sont assez éloignés pour qu'en les regardant les axes optiques des deux yeux deviennent sensiblement parallèles, nous n'avons plus de règle sûre pour déterminer leur distance ; alors nous avons recours à des considérations plus ou moins trompeuses ; nous tenons

compte de l'éclat de la lumière, de la netteté avec laquelle nous distinguons les détails, de la grandeur des objets eux-mêmes, si elle nous est connue d'avance, etc. ; par ces divers moyens, habilement combinés, quelques observateurs parviennent à une étonnante précision dans leurs jugemens; mais s'ils changent de lieu ou de climat, leur science est à chaque instant déroutée par un autre aspect du ciel, un air plus pur ou plus brumeux, ou par des objets d'une forme nouvelle.

Le jugement de *la grandeur* est, en général, une conséquence du jugement de la distance. L'image d'un vaisseau peut être au fond de l'œil d'un observateur beaucoup plus petite que celle d'une barque, et cependant l'observateur ne s'y trompera pas, il dira que le vaisseau est plus grand que la barque, parce qu'il pourra juger que sa distance est beaucoup plus grande. Cependant quand nous savons d'avance la grandeur d'un objet, nous pouvons nous en servir pour estimer sa distance; c'est ainsi, par exemple, que la hauteur d'une tour est mieux appréciée quand on voit sur son sommet des hommes ou des objets d'une grandeur connue; mais si ces hommes étaient des nains, l'œil ne s'y laisserait pas prendre, il trouverait sans doute dans les modifications de la lumière des moyens de se défendre de l'illusion.

551. *Avec les deux yeux on ne voit qu'un objet, mais on le voit plus éclairé.*

Quand nous regardons un tableau avec les deux yeux, nous donnons aux figures qui le composent une position déterminée par rapport à nous, et comme cette position est exactement la même, soit que nous regardions avec l'un des deux yeux ou avec l'autre, il est impossible que le tableau nous paraisse double quand nous le voyons avec les deux yeux ensemble. Il n'en est plus de même lorsque nous regardons un objet qui se projette sur un second plan un peu plus reculé; cet objet cache à l'un

des yeux une partie du second plan et à l'autre une autre partie; par conséquent, avec les deux yeux, on est embarrassé de savoir sur quelle partie du plan il doit tomber; mais il n'arrive presque jamais que les deux yeux aient une égale force, ou plutôt il y en a toujours un qui l'emporte et auquel nous prêtons une plus forte attention; c'est d'après les impressions de celui-là que nous décidons.

Pour juger qu'un objet vu par les deux yeux est vu plus éclatant que s'il était vu par un seul, il suffit de regarder une bande de papier blanc avec l'un des yeux et de placer devant l'autre un obstacle qui nous en cache la moitié. La partie qui est vue par les deux yeux à la fois paraît beaucoup plus éclairée que celle qui n'est vue que par un seul.

552. *De quelques accidens de la vue.* Les *presbytes* ont la vue *trop longue*, ils sont obligés de placer à deux ou trois pieds de distance un papier qu'ils veulent lire; plus près toutes les images sont confuses. Cette espèce d'infirmité, qui vient d'ordinaire avec l'âge, résulte évidemment d'un défaut de convergence dans les faisceaux qui traversent les humeurs de l'œil; et l'on suppose, en général, qu'elle tient à un aplatissement de la cornée ou du cristallin. Tous les presbytes ont habituellement la pupille très-peu ouverte, comme s'ils faisaient un effort continuel pour se servir du centre du cristallin, plutôt que des bords, qui ont en effet, comme nous l'avons vu, une distance focale encore plus grande.

Les *myopes* ont la vue *trop courte;* pour voir nettement les objets ils sont obligés de les approcher à la distance de quelques pouces; tout ce qui se trouve au-delà est pour eux enveloppé d'un nuage, et ne forme au fond de l'œil que des images confuses. Cet accident est opposé au presbytisme, et il résulte en effet d'une cause contraire: les faisceaux qui traversent l'œil d'un myope éprouvent une trop rapide convergence; ils se croisent avant de

tomber sur la rétine. On suppose, en général, que les myopes ont la cornée ou le cristallin trop convexe; on remarque aussi que leur pupille est toujours très-dilatée; comme s'ils essayaient de se servir des bords du cristallin plutôt que des parties centrales, qui ont une distance focale principale encore plus désavantageuse pour eux, parce qu'elle est plus petite.

De quelque manière que s'accomplisse la vision distincte, soit qu'elle se fasse à la distance moyenne de huit à dix pouces, comme dans les bonnes vues, soit qu'elle se fasse à plusieurs pieds, comme chez les presbytes, ou a quelques pouces seulement, comme chez les myopes, il arrive toujours que, pour voir avec la plus grande netteté, il est nécessaire de tourner l'œil convenablement, de telle sorte que l'image tombe sur un certain point de la rétine et non pas sur un point quelconque. Le point, ou plutôt le petit espace sur lequel on amène les images pour voir le mieux possible, se nomme le *point sensible* de la rétine; il est placé en général près de l'axe de l'œil.

Il y a aussi au fond de l'œil un point que l'on appelle le *point insensible* ou *punctum cæcum*, c'est le petit espace circulaire occupé par l'extrémité du nerf optique et d'où partent tous les filamens nerveux qui s'entrelacent de mille manières pour former la rétine. La lumière qui tombe sur cet espace ne donne pas plus d'impression que si elle tombait sur un nerf quelconque mis à découvert; et, comme on ne distingue pas la lumière par les nerfs de l'ouïe, du goût ou de l'odorat, non plus que par les nerfs des bras ou des jambes, on ne distingue pas la lumière par le nerf optique avant qu'il soit épanoui en réseau et étalé sur la choroïde. Ce fait remarquable semble bien indiquer encore que la rétine sent les images sur la choroïde comme la main sent les formes, les contours et les divers degrés de poli des corps qu'elle touche.

On reconnaît l'existence et la position du point insen-

sible de la rétine par l'expérience suivante, *Fig.* 243. Sur un fond noir et horizontal NN' on place deux petits disques blancs ou deux petites boules, dont les centres soient à environ trois pouces l'un de l'autre; ensuite on regarde d'en haut à la distance de 10 ou 12 pouces, et dans une position telle que l'œil droit soit verticalement au-dessus du disque du gauche et que la ligne des deux yeux soit parallèle à la ligne des disques. Ces deux conditions étant remplies, on ferme l'œil gauche, et l'on regarde le disque de gauche avec l'œil droit, en l'éloignant ou en l'approchant un peu, mais toujours dans la même verticale; alors on trouve une position où le disque de droite est complètement invisible. Plus près ou plus loin il reparaît à l'instant, et jamais on ne cesse de le voir si la ligne des deux yeux est seulement un peu oblique par rapport à celle des disques.

Le docteur Wollaston a observé sur lui-même un phénomène de vision extrêmement remarquable, et il en a tiré une conséquence bien curieuse sur la marche et la distribution des filets nerveux dans le nerf optique. Un jour, après un violent exercice de deux ou trois heures, il reconnut soudainement qu'il ne pouvait plus distinguer que *la moitié* des objets: en regardant, par exemple, le mot NEWTON, il voyait les trois dernières lettres TON sans rien apercevoir des trois premières; de même, en regardant un homme en face, il ne voyait que la moitié de sa figure et la moitié de son corps, etc. Ce phénomène de *semi-vision* dura un quart d'heure environ; il avait lieu pour un œil comme pour l'autre, ou pour les deux ensemble; c'était la moitié gauche des objets qui était invisible, c'était par conséquent la moitié droite de chacun des yeux qui était insensible, *Fig.* 248.

Vingt ans plus tard, en 1824, le même phénomène se renouvela sans aucune cause apparente, mais en sens inverse; c'était, cette fois, la moitié droite des objets qui

était invisible, et par conséquent, la moitié gauche des yeux qui était insensible. Wollaston a eu l'occasion de constater des affections pareilles sur deux de ses amis; pour l'un, elle a été passagère, pour l'autre, elle a été permanente et probablement accompagnée d'un épanchement.

M. Arago a souvent éprouvé cette semi-vision, et comme Wollaston, tantôt à droite, tantôt à gauche, mais toujours pour un temps assez court. On peut remarquer que, dans aucun cas jusqu'à présent connu, le phénomène ne s'est manifesté sur un œil seulement, et que jamais non plus il ne s'est manifesté dans le sens horizontal; c'est toujours par des plans verticaux que se sont trouvés partagés les objets dont on n'apercevait que la moitié. Ces faits étant bien constatés, voici la conséquence physiologique que le Dr Wollaston en a tirée. Puisque les deux moitiés droites de l'œil peuvent perdre simultanément leur sensibilité sans que les moitiés gauches soient affectées, *et vice versâ*, il est probable que c'est un seul et même nerf qui se distribue aux deux moitiés droites, et un autre nerf qui se distribue aux deux moitiés gauches. Or, il y a deux nerfs optiques N et N′ (*Fig.* 248) qui sortent du cerveau pour venir se distribuer aux yeux et former les deux rétines par leur épanouissement; ces deux nerfs se rapprochent et semblent *se croiser* ou *se confondre* un instant, au-dessus du sphénoïde en c c′; il faut donc qu'ils éprouvent une *semi-décussation*, c'est-à-dire, qu'ils se croisent seulement à moitié. Pour le nerf de droite, la partie c′R′ reste à droite et vient se distribuer en D d′, tandis que la partie R′R passe à gauche pour aller se distribuer dans la partie G d; pour le nerf de gauche, la partie GR reste à gauche et se distribue en G g, tandis que la partie RR′ passe à droite pour aller se distribuer en D g′. C'est ainsi que le phénomène de la *semi-vision* devient une preuve du fait de la *semi-décussation*.

Les anatomistes avaient disputé long-temps sur la ques-

tion de savoir s'il y a au-dessus du sphénoïde juxta-position des deux nerfs optiques ou décussation complète, c'est-à-dire, croisement de tous les filets. Les preuves pathologiques ne manquaient ni à l'une ni à l'autre des opinions; car on cite des cécités de l'œil droit accompagnées d'une atrophie complète du nerf optique gauche avant le rapprochement, ce qui annoncerait la décussation; et l'on cite aussi des cécités pareilles accompagnées d'une atrophie du nerf optique droit dans toute sa longueur, soit avant soit après le rapprochement, ce qui annoncerait une simple juxta-position. Les observations du Dr Wollaston ne paraissent pas cependant avoir porté la conviction dans tous les esprits; M. Magendie a fait, par exemple, sur les lapins, des expériences intéressantes qui le conduisent à admettre la décussation complète; mais il ne faut pas oublier que Wollaston n'a parlé que des nerfs optiques de l'homme, et je ne connais jusqu'à présent aucune expérience bien faite qui soit contraire à son opinion.

Il y a plusieurs maladies qui peuvent produire l'affaiblissement ou même la perte totale de la vue. Quelquefois la cornée devient opaque et se couvre de taches blanches que l'on nomme des *taies*. Ces taches sont comme des écrans opaques posés devant la pupille, et leur grandeur, leur forme ou leur position produisent des phénomènes variés dont il est facile de se rendre compte d'après ce que nous avons dit des lois de la vision.

La pupille peut être complétement fermée par suite de quelques accidens; le seul remède est alors de faire une pupille artificielle, c'est-à-dire, une ouverture aussi rapprochée du centre qu'il est possible.

Le cristallin peut devenir opaque dans toute son étendue, ou seulement dans quelques parties; on est alors affecté de ce qu'on appelle la *cataracte*. Pour remédier à ces affections qui malheureusement ne sont pas rares, il faut déplacer le cristallin; l'opération se fait tantôt par

abaissement, tantôt par *ablation*. Dans le premier cas, le cristallin est seulement enfoncé dans l'humeur vitrée et disparaît après quelque temps; dans le second cas, il est extrait par une ouverture que l'on pratique latéralement dans le globe de l'œil.

Après avoir rapporté les faits les plus intéressans et les mieux connus sur les phénomènes de la vision, nous pouvons maintenant étudier successivement les divers instrumens d'optique.

BÉSICLES.

553. Les bésicles sont les lunettes dont se servent les presbytes et les myopes pour avoir une vision distincte des objets à la distance moyenne de 8 ou 10 pouces.

Supposons, par exemple, qu'un presbyte ne puisse voir nettement qu'à la distance de 30 pouces; alors il est évident que pour lui les images ne peuvent être nettes, à moins que la lumière ne pénètre dans ses yeux avec la divergence qu'elle a en venant de 30 pouces de distance. Ainsi, pour qu'il puisse voir comme une personne douée d'une bonne vue, les objets à 10 pouces, il suffit de placer les objets à cette distance et de modifier par une lentille la lumière qu'ils envoient, pour qu'elle ne soit pas plus divergente que si elle venait de 30 pouces. Par conséquent, la distance B de l'objet à la lentille étant de 10 pouces, la distance de l'image virtuelle M devra être de 30 pouces; on aura donc (535)

$$\frac{1}{30} = \frac{1}{F} + \frac{1}{10}$$

d'où $F = -15$.

C'est-à-dire, qu'un presbyte, qui voit naturellement à 30 pouces, doit employer immédiatement au-devant de l'œil

un verre convergent de 15 pouces de distance focale principale pour voir les objets à 10 pouces.

En général, si D représente la distance de vision distincte d'un presbyte, la distance focale principale F de la lentille convergente dont il doit faire usage pour voir à 10 pouces, sera donnée par cette formule :

$$F = \frac{10\,D}{10 - D}$$

Le signe moins qui précède la valeur numérique de F lorsqu'on met pour D sa valeur, annonce que la lentille doit être convergente.

Supposons maintenant qu'un myope ne puisse voir nettement qu'à 5 pouces, et cherchons quel verre il doit employer pour voir à 10 pouces. Pour qu'il puisse voir à 10 pouces, il faut évidemment que la lumière qui lui vient de cette distance soit aussi divergente que si elle venait de 5 pouces; il faut donc que sa divergence soit augmentée par la lentille, et la distance focale principale de cette lentille doit être telle qu'un objet placé à 10 pouces au-devant d'elle, donne un foyer virtuel à 5 pouces. On a donc

$$\frac{1}{5} = \frac{1}{F} + \frac{1}{10}$$

d'où F = 10.

C'est-à-dire qu'un myope qui voit nettement à 5 pouces, doit employer des verres divergens, dont la distance focale principale soit de 10 pouces.

En général, si D représente la distance de vision distincte d'un myope, la distance focale principale F de la lentille, dont il doit faire usage pour voir nettement à 10 pouces, sera donnée par cette formule :

$$F = \frac{10D}{10 - D}$$

résultat qui est le même que le précédent; seulement D pour les myopes est plus petit que 10, et les valeurs de F étant toujours positives, on voit que les lentilles seront toujours divergentes.

LOUPES ou MICROSCOPES SIMPLES.

554. Un *microscope simple* n'est autre chose qu'une lentille convergente d'un très-court foyer; on l'appelle aussi une *loupe*. Cet instrument sert à voir de petits objets ou de petits détails qu'il serait impossible de saisir à la vue simple. Les botanistes en font un usage continuel pour observer les organes délicats des plantes; les horlogers pour travailler et pour ajuster les pièces qui doivent avoir à la fois une extrême petitesse et une extrême précision, etc.

L'objet que l'on regarde à la loupe simple doit être toujours placé en avant, *à une distance moindre que la distance focale principale;* sa position varie avec la portée de la vue, mais il est facile de déterminer dans tous les cas le point précis où il faut le tenir. En effet, soit X la distance à laquelle il faut placer l'objet au-devant d'une loupe, dont la distance focale principale est F, en supposant que l'œil de l'observateur soit appliqué immédiatement contre la loupe, et que pour lui la distance de la vision distincte soit représentée par D; il faut évidemment que les faisceaux qui partent de la distance X possèdent, après avoir traversé la loupe, la même divergence que s'ils venaient naturellement d'une distance D; c'est-à-dire qu'après l'émergence, ils doivent faire leur foyer à une distance D. On a donc

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{F} + \frac{1}{X}$$

d'où $X = \frac{FD}{F - D}$

Si la loupe a, par exemple, 1 pouce de foyer, on aura

$$F = -1 \text{ et } x = \frac{D}{1+D}$$

Ainsi, pour une bonne vue, D étant égal à 10, on aurait $x = \frac{10}{11}$, c'est-à-dire que l'objet devrait être placé à 10 onzièmes de pouces au-devant de la loupe. Un myope pour lequel D serait égal à 5, le placerait seulement à 5 sixièmes de pouce, et un presbyte pour lequel D serait égal à 60, le placerait à 60 soixante-unièmes, c'est-à-dire presque exactement au foyer. La figure 238 représente la marche des rayons dans la loupe : AB est la position de l'objet, et A′B′ celle de son image virtuelle. Vus du centre optique C de la loupe, l'objet et l'image sont vus sous le même angle, et les triangles semblables ACB et A′CB′, donnent

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{CP'}{CP} = \frac{D}{x} = \frac{F-D}{F}$$

A′B′ divisé par AB est le rapport de la grandeur de l'image à celle de l'objet ou le *grossissement;* ainsi la loupe précédente de 1 pouce de foyer, donne un grossissement de 11, pour une vue moyenne, de 6 pour un myope de 5 pouces, et de 61 pour un presbyte de 60 pouces.

Il est facile de voir qu'une loupe de 1 ligne de distance focale principale donnerait pour les trois vues précédentes des grossissemens respectifs de 121 pour la vue moyenne, 61 pour le myope, et 721 pour le presbyte.

Les loupes d'un très-court foyer sont très-difficiles à travailler. Mais les physiciens avaient imaginé autrefois divers moyens ingénieux de suppléer au travail mécanique : les uns tiraient le verre en fil très-fin, et faisaient fondre le fil à la flamme de l'alcool; la capillarité le rassemble alors en une goutte très-sensiblement sphérique; les autres, après avoir choisi du verre très-pur, en mettaient quelques parcelles dans un petit trou creusé dans du charbon, et les

faisaient fondre à la flamme du chalumeau; la goutte se rassemble comme dans l'expérience précédente, et quand elle est très-petite, elle n'est pas sensiblement aplatie par son poids. Ces moyens, et quelques autres pareils, peuvent encore être employés avec avantage. Cependant on doit préférer les *loupes périscopiques* du Dr Wollaston. Ces loupes se composent de deux segmens sphériques, séparés par un diaphragme opaque, qui arrête les rayons des bords (*Fig.* 238 bis); elles ont le double avantage d'avoir un court foyer et très-peu d'aberration de sphéricité, parce que les rayons qui passent près du centre peuvent seuls arriver à l'œil.

CHAMBRE CLAIRE ou CAMERA LUCIDA.

555. *Chambre claire de Wollaston.* Cet appareil sert à tracer une image fidèle, d'un objet, d'un édifice, d'un paysage, etc. Il se compose essentiellement d'un prisme quadrangulaire A B C D (*Fig.* 261), ayant en B un angle droit, et en D un angle obtus de 135°. La face C B est tournée vers l'objet dont on veut prendre le dessin; R X, par exemple, étant l'axe d'un pinceau envoyé par un point de cet objet, on voit que ce rayon, après avoir pénétré perpendiculairement dans l'intérieur du prisme par la face C B, éprouve en R une première réflexion totale sur C D, en R′ une seconde réflexion totale sur A D, et vient enfin sortir perpendiculairement à la face A B, près du sommet A du prisme. L'œil étant placé un peu au-dessus de cette face, de manière que la pupille soit en P P′, son milieu correspondant au sommet A, il est évident 1° que par la moitié antérieure de la pupille on verra, par réflexion, l'image de l'objet x sur le prolongement de E R′; et 2° que par l'autre moitié de la pupille on verra directement le point d'un tableau horizontal, sur lequel cette image se projette. Ainsi, en tenant avec la main la pointe d'un crayon sur ce point du ta-

bleau, on pourra distinguer à la fois l'image et la pointe du crayon. Ce raisonnement s'appliquant aux points voisins du point x, il en résulte que l'on verra sur le tableau une image d'une certaine étendue, et la pointe du crayon en pourra tracer les contours les plus délicats. Tel est le principe sur lequel repose la construction de la chambre claire de Wollaston, et c'est seulement pour fixer les idées que nous avons supposé la pupille partagée en deux parties égales par la verticale du sommet A; car il est évident qu'elle peut varier de position dans de certaines limites; la seule condition importante est qu'elle reçoive à la fois des rayons réfléchis et des rayons directs.

Pour que cet instrument soit commode dans la pratique et ne fatigue pas la vue, il y a quelques précautions qu'il ne faut pas négliger.

1° La pointe du crayon étant à la distance de la vision distincte, tandis que l'objet est en général très-éloigné, il est évident que les faisceaux directs et les faisceaux réfléchis n'ont pas le même degré de divergence, et que l'œil ne peut pas s'ajuster pour voir avec la même netteté l'image qui résulte des premiers, et celle qui résulte des seconds. C'est pourquoi il faut mettre au-devant de B C une lentille convergente qui donne aux faisceaux réfléchis la même divergence qu'aux faisceaux directs.

2° L'éclat de l'image réfléchie peut être assez vif pour éclipser l'image directe ou *vice versâ*; c'est pourquoi il faut adapter au prisme un verre coloré, que l'on tourne tantôt du côté de l'objet, tantôt du côté du tableau, pour atténuer l'éclat de l'image la plus vive.

3° Il faudrait beaucoup d'attention, et une assez longue habitude, pour maintenir l'œil dans une position convenable; c'est pourquoi on lui donne un point de repère, en adaptant au prisme un petit diaphragme ou une petite pièce mobile, percée d'une ouverture de 5 ou 6 millimètres de diamètre; quand cette ouverture est bien ajus-

tée, il suffit d'en approcher la pupille et de la maintenir dans une position correspondante.

4° Les presbytes, et surtout les myopes, doivent se servir de leurs bésicles pour regarder dans la chambre claire; c'est par ce moyen seulement qu'ils pourront placer le tableau à une distance commode, et obtenir des images qui ne soient ni trop grandes ni trop réduites; car il est facile de voir que l'objet et l'image sont à peu près dans le même rapport que leurs distances au prisme.

La figure 263 représente une chambre claire de Wollaston, disposée pour dessiner sur le tableau B B′ l'image des objets vus du côté de X.

V Vis de pression qui sert à fixer le pied de l'appareil sur le tableau.

C Charnière qui permet d'incliner plus ou moins le tube qui porte le prisme.

T′ Tube qui sort du tube T, et qui peut être tiré plus ou moins.

R Verre coloré, tourné du côté du papier.

L Lentille convergente, tournée du côté de l'objet.

556. *Chambre claire de M. Amici.* En essayant de perfectionner la chambre claire de Wollaston, M. Amici, de Modène, a été conduit à diverses dispositions ingénieuses, dont nous ne pouvons ici indiquer les détails. (*Ann. de chym., et de phys.* t. 22, p. 137.) Cependant nous ferons connaître la disposition suivante, qui paraît offrir de notables avantages (*Fig.* 262).

P P′ est une lame de verre à faces parallèles, au devant de laquelle est disposé un prisme isocèle A C B, dont l'angle C est à peu près un angle droit; le côté A C du prisme est perpendiculaire à la face de la lame. L'axe d'un faisceau qui vient dans la direction D X pénètre dans le prisme en se réfractant, et éprouve successivement deux réflexions totales, l'une sur la base A B du prisme, l'autre sur la surface antérieure du verre parallèle. L'œil le reçoit, et voit

son image sur le prolongement de ER′; en même temps il voit directement au-delà du verre un point T très-voisin du lieu de l'image, et qui se confond avec elle au fond de l'œil. On peut donc suivre les contours des objets avec plus de facilité que dans la chambre claire de Wollaston, parce que la pupille peut s'écarter dans des limites plus étendues, sans crainte de perdre de vue l'un des deux objets qu'elle doit saisir à la fois.

CHAMBRE NOIRE.

557. *Chambre noire.* La chambre noire est destinée à produire sur un tableau l'image réelle d'un champ de vision plus ou moins étendu. Dans sa construction la plus simple, elle consiste en un seul verre convergent LL′ (*Fig.* 246), placé dans l'ouverture du volet d'une chambre complétement fermée FGHV. Si du centre optique C de la lentille on décrit un cône dont l'angle ACT soit égal au champ qu'elle peut embrasser, tous les objets compris dans ce cône viendront former des images nettes à des distances plus ou moins grandes dans l'intérieur de la chambre noire. Il semble par conséquent qu'il soit impossible d'avoir à la fois l'image distincte de tout le paysage AT; mais si le tableau est concave, et s'il est une portion de sphère T′A′ d'un rayon égal à la distance focale principale de la lentille, il suffira de l'incliner convenablement en T′A″, par exemple, pour avoir une représentation fidèle de tout le champ de vision; seulement, s'il y avait des objets très-voisins, comme un arbre B, il serait impossible d'avoir en même temps son image et celle du sol sur lequel il se projette, en le regardant du point C.

Dans cet appareil, les images sont *renversées*. Pour les redresser et les amener à la portée de la vue, on place ordinairement un miroir étamé au dehors et en avant de la lentille; on obtient même par là un autre avantage, c'est

qu'en faisant tourner le miroir ou en l'inclinant de diverses manières, on peut amener sur le tableau successivement tous les points de vue qui sont au-devant du volet.

Pour que les images soient plus vives et plus nettes, il est bon d'intercepter, avec des tubes et des écrans convenablement ajustés, tous les rayons lumineux qui ne partent pas du champ de l'instrument.

La figure 239 représente une chambre noire portative. Il sera facile, d'après ce que nous venons de dire, d'en saisir la disposition.

MM. Vincent et Charles Chevallier, qui construisent ces divers appareils avec beaucoup de soins, ont imaginé un perfectionnement qui offre plusieurs avantages. Au lieu d'employer un ménisque convergent et un miroir séparé, ils travaillent une pièce de verre, un *prisme ménisque*, qui remplit à la fois le double objet. Ce prisme ménisque est représenté dans la *Fig.* 237; c'est un prisme dont les faces CB et CA sont, l'une concave, et l'autre convexe. La lumière qui entre par celle-ci éprouve une réflexion totale sur la base AB du prisme, et, en sortant par la face concave CB, elle a le même degré de convergence que si elle avait traversé un ménisque ordinaire.

LANTERNE MAGIQUE.

558. *Lanterne magique.* Cet appareil, imaginé autrefois par le P. Kircher, mérite encore quelque attention de la part des physiciens, parce qu'il a été l'origine de plusieurs inventions, et parce qu'il n'est pas uniquement restreint à n'offrir à la curiosité que des images grotesques. Il se compose (*Fig.* 234) d'une lampe P destinée à produire la lumière, d'un miroir concave M de deux lentilles convergentes C et C′, dont le seul effet est d'éclairer convenablement l'objet B; enfin d'une lentille à court foyer LL′,

qui doit produire les images sur un tableau éloigné. L'objet est une lame de verre sur laquelle sont peints divers sujets en couleurs plus ou moins vives et plus ou moins foncées. Le miroir M et les lentilles C et C′ sont ajustés pour donner en B sur le verre un cercle lumineux très-brillant. Ce verre étant placé un peu plus loin que le foyer principal F de la lentille L L′, il est évident qu'il doit faire son image réelle à une distance plus ou moins grande de l'autre côté de cette lentille. C'est cette représentation amplifiée de l'objet qui forme le spectacle de la lanterne magique. Pour lui donner tout son éclat, on a soin de faire les expériences dans une chambre complétement obscure ; la lampe et les verres sont enfermés dans une caisse de bois ou de ferc-blanc, et les spectateurs, placés devant le tableau, ne reçoivent d'autre lumière que celle de l'image et du champ circulaire dans lequel elle est circonscrite.

PHANTASMAGORIE.

559. *Phantasmagorie.* La phantasmagorie n'est qu'une modification de la lanterne magique : dans ces deux instrumens les objets sont éclairés et amplifiés par les mêmes verres, ajustés de la même manière ; seulement dans la phantasmagorie, les objets et le tableau doivent éprouver un déplacement relatif, combiné de telle sorte que le tableau devienne toujours exactement le lieu de l'image. Par exemple, quand l'objet se rapproche du foyer son image est plus grande et va se faire plus loin ; il faut donc que le tableau s'éloigne d'une quantité convenable ; au contraire, quand l'objet s'éloigne du foyer, son image est plus petite et vient se faire plus près, il faut donc que le tableau se rapproche ; et pour que ces changemens puissent s'accomplir, sans que l'image cesse d'être distincte et visible pour les spectateurs, il faut combiner un mécanisme assez simple pour que tous ces mouvemens soient

exécutés sans bruit et avec précision. Ces conditions remplies il en reste encore une autre non moins importante, pour donner aux apparitions phantasmagoriques tous leur prestige; il faut que les spectateurs soient dans les plus profondes ténèbres et ne distinguent d'autre lumière que celle qui vient peindre avec éclat les différens traits de l'image. Pour remplir cette condition, le plus sûr moyen est de faire le tableau avec du taffetas gommé ou plutôt avec une toile enduite de cire et très-unie; alors sa translucidité est suffisante pour que l'image puisse être vue par derrière très-distinctement à la distance de 15 ou 20 pas. Les spectateurs qui la regardent n'ont aucune conscience de la distance absolue, parce qu'ils ne distinguent aucun objet intermédiaire, et ils ne peuvent se défendre d'une illusion complète. On ne leur montre d'abord qu'une image très-petite, qui paraît dans les ténèbres comme un point lumineux très-éloigné, puis, cette image se développant peu à peu, semble s'avancer à grands pas et même se précipiter sur les spectateurs. Ce phénomène de vision est remarquable et montre à quel point il est facile de nous tromper par les yeux; car la connaissance des lois de l'optique et du mécanisme de l'appareil ne saurait nous sauver de l'illusion.

La figure 233 représente le détail d'une phantasmagorie; les objets sont peint sur verre, comme pour la lanterne magique, et glissent dans la coulisse c; on peut aussi en faire passer plusieurs à la fois et les faire mouvoir pour imiter des jeux de physionomie.

MICROSCOPE SOLAIRE.

560. *Microscope solaire.* Cet instrument dont les effets peuvent être comptés parmi les plus curieux et les plus instructifs de l'optique a été imaginé en 1745, par Lieberkuhn, de l'académie de Berlin. Il a la plus grande analo-

gie avec la lanterne magique de Kircher : c'est encore un système de verre pour éclairer l'objet et une lentille de court foyer pour en donner une image réelle ; mais la lumière qu'on emploie est alors la lumière du soleil.

Le microscope solaire qui nous paraît maintenant le plus parfait, soit pour la netteté des images, soit pour la clarté et le grossissement, est représenté dans la figure 235, sur une échelle de demi-grandeur. Le système d'éclairage se compose d'un miroir plan de verre M, d'une première lentille éclairante R I, de 15 ou 18 lignes de diamètre, et d'une seconde lentille d'un court foyer S U que l'on appelle le *focus*. Le miroir M réfléchit la lumière solaire, et dirige dans le tube T, parallèlement à son axe, un faisceau qui en doit remplir toute l'étendue ; la lentille objective imprime à la lumière de ce faisceau un premier degré de convergence ; le focus qui la reçoit ensuite la fait converger davantage, et de telle sorte qu'elle aille faire son foyer à très-peu près sur l'objet qui est en expérience. Pour remplir cette condition il est nécessaire que le focus soit mobile, et on le fait mouvoir en effet au moyen d'une crémaillière qui règne le long de sa monture et d'un pignon dont le bouton B est au dehors du tube.

L'ajustement de l'objet est un point important : lorsqu'on veut observer par exemple les corps très-petits contenus dans les liquides, comme les globules du sang ou les animalcules de différentes espèces, ou les molécules cristallines que déposent les dissolutions en s'évaporant, etc.; il suffit d'étaler une goutte du liquide sur une lame de verre à faces parallèles et de porter cette lame sous la lumière du focus en tournant le liquide de son côté. Dans plusieurs autres circonstances l'objet doit être simplement placé entre deux lames de verre ; et il y a des cas enfin où il faut l'enfermer dans une boîte à faces de verre remplie de liquide ; c'est ce qui arrive quand on veut observer la circulation du sang dans la queue des têtards ou dans les

extrémités de quelques poissons, et aussi quand on veut observer la circulation des globules du chara. Tous ces objets, disposés comme nous venons de le dire, peuvent être ajustés au microscope d'une manière commode au moyen du mécanisme qui est représenté en P P′ (*Fig.* 235). P et P′ sont des lames carrées de cuivre unies aux quatre coins par de petites tiges de même métal; sur chaque tige est un ressort en spire qui pousse la troisième plaque Q contre la plaque P′; c'est entre Q et P′ que se glissent les lames ou les assemblages de lames qui portent l'objet. Ce système de plaques doit encore tourner autour du tube T, pour qu'il soit possible de donner à l'objet toutes les positions sans le déranger et même sans perdre de vue son image.

L'objet ainsi ajusté et convenablement éclairé par le focus, il est facile d'en obtenir l'image amplifiée; pour cela on fait mouvoir la lentille L, qui est véritablement la lentille objective; cette lentille se déplace au moyen d'une crémaillère adaptée à sa monture et d'un pignon dont le bouton est en B′; on l'approche et on l'éloigne de l'objet jusqu'à ce qu'on obtienne enfin une image nette et brillante sur un grand tableau de toile blanche ou de papier, placé à la distance de 10, 15, ou 20 pieds. Puisque l'image est réelle, il en résulte que l'objet se trouve au-delà du foyer de la lentille L, et il sera facile, d'après nos formules sur les lentilles (535), de déterminer avec précision la position de l'objet, lorsqu'on connaîtra la distance focale principale de la lentille et la distance du tableau; il sera facile aussi d'en déduire le grossissement. Mais si l'on veut observer le grossissement d'une manière directe, il faudra prendre pour objet, un micromètre en verre portant des divisions de grandeurs connues, et mesurer l'étendue que ces divisions occupent sur le tableau.

Dans les microscopes anciens l'image est toujours sillonnée des couleurs du spectre, surtout près de ses contours et près des parties les plus opaques; MM. Vincent et Charles

Chevalier sont parvenus à éviter cet inconvénient en adaptant, pour objectif, à leurs microscopes, des lentilles achromatiques d'un assez court foyer, comme, par exemple, de 2, 3 ou 4 lignes. Pour obtenir de forts grossissemens on peut employer ensemble deux ou même trois de ces lentilles au lieu de la lentille unique que nous avons figurée en L.

Le microscope solaire, ainsi perfectionné, deviendra sans doute un instrument précieux pour une foule de recherches physiques et aussi pour les recherches de botanique et d'anatomie.

MÉGASCOPE.

561. *Mégascope.* Cet instrument est destiné à donner des copies réduites ou amplifiées, d'une gravure, d'un tableau, d'une bosse ou d'un bas-relief qui n'a pas une trop grande étendue. Il a été imaginé par Charles vers 1780, et depuis cette époque on en a fait plusieurs applications intéressantes pour les arts. Le principe de sa construction est encore celui de la lanterne magique, de la fantasmagorie ou du microscope solaire; le mégascope ne diffère de ces derniers instrumens que par la nature des objets dont il donne les images, et par la manière dont ces objets sont éclairés. Ainsi, en dernier résultat, il se réduit à une seule lentille L L′, *Fig.* 236, au-devant de laquelle on place l'objet B dont on veut avoir l'image réelle sur un tableau, ou dont on veut prendre la copie. Mais voici les principales conditions qu'il faut remplir pour avoir en même temps des images parfaitement nettes et pour varier les grossissemens.

1° La lentille L L′ doit avoir 28 à 30 lignes de diamètre afin d'embrasser un champ assez étendu et de donner assez de clarté à l'image; elle doit être montée dans un tube un peu long qui arrête la lumière des nuées et les reflets latéraux; on peut encore, pour mieux assurer cet effet,

mettre dans le tube un diaphragme convenable. Enfin, au lieu d'une seule lentille on peut en mettre plusieurs à une petite distance l'une de l'autre, pour donner plus de convergence aux faisceaux incidens.

2° Au-devant de l'ouverture, à laquelle on adapte avec soin la monture de la lentille, se trouvent fixées au même niveau deux barres de fer horizontales; on en voit une en F R, et on voit leur ajustement en F R F'. Ces barres supportent une espèce de char C H qui roule sur des galets, et dont la planche verticale C est destinée à recevoir les objets. Une double corde, dont les extrémités reviennent dans la chambre noire, est attachée au char, et sert à le faire avancer ou reculer, pour approcher ou éloigner l'objet B. Enfin deux ou plusieurs miroirs plans de verre étamé sont disposés au-devant du volet pour réfléchir sur l'objet l'image du soleil, et projeter les ombres dans un sens ou dans l'autre; lorsqu'on expérimente sur des bosses ou des bas-reliefs, les miroirs peuvent être fixés au char pour se mouvoir avec lui.

3° Le tableau sur lequel on reçoit les images peut être en papier ou en mousseline comme pour le microscope solaire; alors on observe par-devant. Cependant les jeux de lumière que donnent les reliefs se font beaucoup mieux sentir lorsqu'on reçoit les images sur une grande glace convenablement doucie ou dépolie; alors on observe par derrière, et dans ce dernier cas les images peuvent être calquées sur du papier végétal avec beaucoup plus de facilité.

MICROSCOPE COMPOSÉ.

562. *Principes de la construction du microscope composé.* Le microscope composé est destiné, comme le microscope simple, à faire voir la forme, la structure et tout les détails des objets très-petits. On l'appelle microscope

dioptrique, *catoptrique*, ou *catadioptrique*, suivant que les amplifications y sont produites par la *réfraction*, par la *réflexion*, ou par la *réflexion* et la *réfraction* réunies. Nous nous occuperons plus particulièrement ici du *microscope dioptrique*, parce qu'il est à la fois le plus utile et le plus répandu.

Les dispositions très-diverses que l'on a successivement données à cet instrument reposent en dernier résultat sur les deux principes suivans :

1° Les objets que l'on veut soumettre à l'expérience se placent au-devant d'une lentille convergente B B′ et un peu au-delà de la distance focale principale, *Fig.* 259. Cette lentille, simple ou composée, achromatique ou non achromatique, se nomme la *lentille objective*, ou *l'objectif* du microscope.

2° Les images réelles et amplifiées que donnent les objets, à une distance plus ou moins grande derrière l'objectif, sont regardées avec une seconde lentille convergente c c′ qui fait l'office d'une loupe. Cette seconde lentille, qui peut aussi être simple ou composée, achromatique ou non achromatique, se nomme la *lentille oculaire*, ou l'*oculaire* du microscope.

Ainsi tout microscope dioptrique est essentiellement composé d'un objectif et d'un oculaire, et le grossissement définitif est le produit des grossissemens qui résultent de chacun de ces verres, ou de chacun de ces systèmes de verres. Si l'objectif grossit, par exemple, 5 fois en diamètre et l'oculaire 10 fois, le grossissement sera 50 en diamètre et par conséquent 2,500 fois en surface ; il serait 1,000 fois en diamètre et 1,000,000 de fois en surface, si les amplifications de l'objectif et de l'oculaire étaient respectivement 100 et 10, ou 50 et 20, ou 40 et 25, etc.

En ne considérant que ces principes fondamentaux du microscope, il serait facile d'en calculer en même temps les dimensions et les effets. Supposons, par exemple, que

l'objectif ait 5 millimètres de distance focale principale, et l'oculaire 20; l'objet étant placé à 1/10 de millimètre au-delà de la distance focale principale, son image réelle se formerait à 255 millimètres, et l'amplification de l'oculaire serait 40; pour un objet de 1/10 de millimètre de diamètre, l'image aurait donc 4 millimètres d'étendue. Ensuite, pour regarder cette image avec l'oculaire, il faudrait placer celui-ci à $18^{mm},62$ au-devant de l'image (554) (en supposant une vue moyenne de 10 pouces ou 270 millimètres), et l'on aurait encore un grossissement de 14,5; ce qui donnerait un grossissement définitif de $40 \times 14,5 = 580$. Dans cette hypothèse, l'instrument devrait avoir une longueur de $255 \times 18,62 = 273^{mm},62$.

Avec le même objectif et le même oculaire on pourrait obtenir d'autres amplifications, moindres ou plus grandes, suivant que l'on placerait l'objet à des distances plus grandes ou moindres au-devant de l'objectif; mais en même temps il faudrait pouvoir raccourcir ou allonger l'instrument, c'est-à-dire, diminuer ou augmenter la distance des deux verres; car le lieu de l'image réelle se rapprocherait ou s'éloignerait de l'objectif.

L'instrument dont nous venons d'indiquer la théorie est le microscope dioptrique dans toute sa simplicité, ou plutôt dans toute son imperfection, et tel qu'il sortit des mains des premiers inventeurs, vers 1620; c'est du moins ce que l'on peut conclure des documens incertains que l'histoire nous a conservés sur ce sujet; car, si l'on ne peut établir d'une manière précise, ni l'époque de l'invention, ni le lieu où elle prit naissance, ni le nom de l'inventeur, on peut juger cependant, avec quelque probabilité, que le microscope qui fut envoyé par Galilée, en 1612, à Sigismond, roi de Pologne, était construit comme nous venons de le dire, et qu'il en était de même encore du microscope dont Drebbel se servait à Londres en 1619 pour montrer avec enthousiasme une partie de ce monde nouveau

et merveilleux dans sa petitesse qui avait jusque là échappé aux yeux des hommes.

Depuis plus de deux siècles, on conçoit que le microscope a dû recevoir de nombreux perfectionnemens ; presque tous les expérimentateurs y ont travaillé avec plus ou moins de succès. Les uns ont donné plus de régularité aux verres de l'objectif et de l'oculaire, les autres ont trouvé le moyen d'éclairer convenablement les objets et de les disposer d'une manière commode pour en parcourir successivement toute l'étendue. D'autres enfin, comme Ramsden et Campani, se sont appliqués à composer l'oculaire, d'un système de deux ou de trois verres combinés entr'eux d'après certaines lois théoriques ou empiriques, pour produire l'achromatisme dans les images. Tous ces essais ont enrichi la science d'un grand nombre d'instrumens assez parfaits, et d'une foule d'observations intéressantes ; mais le professeur Amici, de Modène, est parvenu il y a quelques années à des perfectionnemens d'une haute importance. Son microscope a une immense supériorité sur tous les microscopes qui l'ont précédé. C'est pourquoi j'ai pensé qu'il serait utile de décrire ici avec quelque détail celui que M. Amici nous a envoyé en septembre 1829 pour notre cabinet de la Faculté des sciences de Paris.

563. *Microscope d'Amici.* Cet instrument est représenté dans son ensemble, *Fig.* 260, et dans ses détails, *Fig.* 249 à 258, sur une échelle de demi-grandeur naturelle. L'objetif est en B B′, *Fig.* 260, l'oculaire en C C′. Le faisceau de lumière par lequel on voit l'objet s'élève d'abord verticalement, ce qui est une condition indispensable, sans laquelle les effets de la pesanteur troubleraient à chaque instant les observations ; mais, au moyen d'une réflexion totale sur l'hypothénuse du prisme R S R′, ce faisceau est renvoyé horizontalement vers l'oculaire, ce qui permet à l'observateur de prendre une position commode, soit pour varier ou prolonger ses expériences, soit pour dessiner les

images qu'il aperçoit. Voici maintenant la disposition des diverses pièces et leur mécanisme.

1° *Objectif.* L'objectif se compose d'une, deux ou trois lentilles achromatiques, *Fig.* 257, dont les distances focales principales sont de 8 à 10 millimètres; elles portent les n° 1, 2, 3; on peut employer la lentille n° 1 seule; ou les lentilles n° 1 et n° 2 avec l'attention de visser la première sur le tube, et la seconde sur la première; ou les lentilles n° 1, n° 2 et n° 3, avec l'attention de conserver encore leur ordre naturel en vissant le n° 3 sur le n° 2. Dans le premier cas on a le moindre grossissement, et l'objet se trouve le plus loin possible de l'objectif; dans le second cas le grossissement est plus fort et l'objet plus près; enfin dans le troisième cas le grossissement est plus fort encore, et l'objet se trouve amené à une très-petite distance de l'objectif.

2° *Oculaire.* Pour chacune des combinaisons de l'objectif, on peut adapter à l'instrument l'un ou l'autre des six oculaires qui sont représentés sous les n°s 1, 2, 3, 4, 5 et 6 dans les figures 251 à 256. Le 1er, le 2e, le 3e et le 4e sont construits sur le même principe; chacun d'eux se compose de deux verres plans convexes A et B, dont la convexité est tournée du côté de l'image; entre ces verres et au point précis où vient se faire l'image réelle de l'objet, se trouve un diaphragme R G dont l'ouverture est convenablement déterminée; dans cette ouverture on place ordinairement, à angle droit, deux fils très-fins qui servent de micromètre. Les oculaires n° 5 et n° 6 sont de simples loupes A d'un foyer très-court.

L'oculaire n° 1 se visse directement sur le tube T T'; pour se servir des autres, on enlève le premier et l'on visse sur le tube la pièce z z', *Fig.* 253, qui peut recevoir successivement les oculaires 2, 3, 4, 5 et 6. Cette disposition donne l'avantage d'avoir des grossissemens très-différens sans rien déranger, ni à l'objectif, ni à l'objet, ni au corps de l'instrument.

Il importe de mettre sur l'oculaire un carton noir N N′ qui arrête toute lumière étrangère, et il importe aussi de garnir en velours noir tout l'intérieur du tube T T′ pour empêcher les reflets latéraux qui viennent troubler la vision et ôter de la netteté aux images.

3° *Ajustement et éclairage des objets transparens.* Les objets transparens doivent toujours être placés entre deux lames de verre, et il y a en général de l'avantage à les mouiller d'une goutte d'eau pure, pour qu'ils soient complétement environnés de ce liquide. Ces lames en général se maintiennent d'elles-mêmes à une distance convenable sans altérer l'objet. S'il arrive, dans quelques occasions, que l'objet doive être simplement placé à sec sur une lame transparente, on peut bien encore l'observer avec le même grossissement, mais son image est toujours moins claire et moins distincte. Le système des lames se place sur l'ouverture V V′ du porte-objet, *Fig.* 260, et la pièce E D D′, qui s'élève ou s'abaisse à frottement dans l'ouverture D D′, sert à les maintenir et à les presser.

Le miroir concave M M′ rassemble la lumière des nuées ou celle d'une lampe pour la concentrer sur l'objet. Le diaphragme mobile F G, que l'on voit en plan dans la *Fig.* 258, sert à modérer l'éclat de la lumière; on le fait tourner plus ou moins pour amener celle des ouvertures qui convient le mieux à l'objet qui est soumis à l'expérience. En général, les corps très-minces et très-transparens exigent une lumière moins éclatante. Au-dessous du diaphragme se trouve encore un verre dépoli V que l'on tourne de manière à recevoir le faisceau lorsqu'on veut employer la lumière solaire ou celle d'une forte lampe.

Enfin l'objet est amené au foyer au moyen d'un pignon P dont le bouton est en P′; il suffit de tourner le bouton P′ dans un sens ou dans l'autre pour faire monter ou descendre tout le système du porte-objet.

4° *Ajustement et éclairage des corps opaques.* Les

corps opaques doivent être placés sur un très-petit disque de verre noir collé sur une lame transparente, et mis ensuite sur le porte-objet. Alors, pour les éclairer, on peut se servir ou de la lentille mobile LL', ou du miroir MM', ou de ces deux moyens réunis. Mais il convient toujours de visser à la dernière lentille objective le petit miroir percé MM', *Fig.* 257, qui réfléchit sur l'objet toute la lumière qu'il reçoit, ou de l'objet lui-même, ou du verre noir, ou du grand réflecteur MM'.

5° *Moyens de parcourir le champ.* On peut voir diverses parties de l'objet en faisant tourner le corps du microscope TT' sur le sommet de la colonne verticale qui le porte au moyen du pivot Y; mais il est toujours mieux de le fixer dans sa position, et de mouvoir seulement le porte-objet. Il y a pour cela deux vis micrométriques K et Q; la première sert à pousser en avant ou à retirer en arrière le char du porte-objet et tout ce qu'il porte; la seconde sert à le faire marcher latéralement de droite à gauche ou de gauche à droite. Au moyen de ces deux mouvemens combinés on peut parcourir toute l'étendue de l'objet dans un sens ou dans l'autre sans perdre de vue son image.

5° *Grossissement.* L'un des meilleurs moyens de déterminer la force amplifiante de ce microscope est d'employer une chambre claire consistant en un simple verre parallèle PP' (*Fig.* 250); cet appareil s'ajuste sur l'un des oculaires au moyen de l'anneau NN'; on place l'œil en H et l'on regarde au travers du verre PP', à une distance déterminée, une règle très-exactement divisée : en même temps que l'on voit les divisions de la règle, on voit aussi par réflexion, sur la première surface du verre PP', l'image de l'objet qui est exposé au microscope. Or, si cet objet est lui-même divisé d'une manière exacte, s'il est, par exemple, une petite bande de verre sur laquelle on ait tracé au diamant des cinquièmes, des dixièmes, ou des centièmes de millimètre, on verra d'un

coup d'œil quel est l'espace occupé sur la règle par une des divisions du micromètre. Si 1/10 de millimètre occupe 10 millimètres, le grossissement est 100; s'il en occupe 20, le grossissement est 200, etc. Voici la table des grossissemens pour le microscope de la Faculté.

Avec l'objectif n° 1 seul,

	En diamètre.	En surface.
L'oculaire N° 1 donne	89.	7921
Id. N° 2. . . .	161.	25921
Id. N° 3. . . .	228.	51984

Avec les objectifs n° 1 et n° 2 ensemble,

	En diamètre.	En surface.
L'oculaire N° 1 donne	196.	38416
Id. N° 2. . . .	354.	125316
Id. N° 3. . . .	501.	251001
Id. N° 4. . . .	1108.	1227664

Avec les objectifs n° 1, n° 2 et n° 3 ensemble,

	En diamètre.	En surface.
L'oculaire N° 1 donne	257.	66049
Id. N° 2. . . .	463.	214369
Id. N° 3. . . .	656.	430336
Id. N° 4. . . .	1453.	2111209
Id. N° 5. . . .	2381.	5669161
Id. N° 6. . . .	4135.	17098225

Ces grossissemens ont été déterminés en projetant l'image sur une règle maintenue à 14 pouces 5 lignes, ou à 39 centimètres du centre de l'oculaire. On peut dire que rien n'est égal à la parfaite netteté des images jusqu'aux amplifications de 501, 463 et 656; pour les amplifications qui dépassent ces limites, la lumière des nuées devient insuffisante : il faut employer la lumière d'une forte lampe ou celle du soleil, et alors, quelque précaution que l'on

prenne ; les images deviennent en même temps moins tranchées vers les bords, et moins distinctes vers leur milieu.

On peut se ménager encore un moyen de varier les grossissemens : c'est d'ajouter au tube du microscope une crémaillère qui permette de l'allonger plus ou moins ; mais on court le risque d'écarter l'axe de l'oculaire de l'axe du faisceau qui donne l'image.

Connaissant la force amplifiante de l'instrument, il est facile de déterminer le diamètre absolu d'un objet quelconque soumis à l'expérience. Pour cela on projette son image au moyen de la chambre claire, *Fig.* 250, sur une règle divisée, et l'on note la longueur qu'elle y occupe à 14 pouces 5 lignes de distance du centre de l'oculaire ; puis l'on divise cette longueur par la force amplifiante que l'on prend dans les tables précédentes, suivant l'objectif et l'oculaire dont on fait usage. Par exemple, avec l'objectif 1, 2 et 3, et l'oculaire n° 4, un globule de sang occupe à très-peu près 12 millimètres ; l'amplification correspondante à ces systèmes est 1453 ; en divisant 12 par 1453 on trouve 0,0082 millimètres, ou environ 8 millièmes de millimètre pour le diamètre absolu de ce globule de sang.

On arrive au même résultat d'une manière plus directe au moyen des vis micrométriques K et Q dont nous avons parlé précédemment. La tête de la vis micrométrique K porte des divisions que l'on peut compter à partir d'un repère fixe. Par exemple, dans l'instrument que je décris, pour chaque division la vis avance ou recule de 0,00246 millimètres, ce qui forme à très-peu près un 10 millième de pouce anglais. Par conséquent, s'il faut tourner de 10 divisions pour faire passer sous le fil micrométrique de l'oculaire l'image entière de l'objet, on peut conclure que, dans ce sens, le diamètre absolu de l'objet est 10 fois 0,00246, ou environ 25 millièmes de millimètre. La tête de la vis Q est pareillement divisée ; pour elle, chaque

division répond à 0,0031 millimètres. Il faut seulement lorsqu'on emploie cette méthode avoir la plus grande attention d'éviter le *temps-perdu* des vis.

Le prix de cet instrument est malheureusement un peu élevé; mais on peut espérer que le travail des verres deviendra bientôt plus sûr et moins coûteux; car il a déjà reçu en peu de temps des perfectionnemens très-sensibles. C'est M. Selligue qui paraît avoir, le premier, exécuté ou fait exécuter des objectifs achromatiques pour les microscopes (1824); et depuis qu'il a eu l'idée de faire cette heureuse application souvent recommandée par les physiciens, on est parvenu à la rendre de plus en plus facile. MM. Vincent et Charles Chevalier y ont surtout contribué par leurs essais et par leurs efforts, et maintenant ils construisent, à Paris, des microscopes d'Amici qui semblent ne rien laisser à désirer.

564. *Microscope catadioptrique d'Amici.* Cet instrument est représenté en demi-grandeur dans la figure 260 *bis*; il s'adapte sur le même pied que le microscope dioptrique de la figure 260. Nous pourrons en peu de mots donner une idée de sa construction. L'objectif est catoptrique, c'est-à-dire, que l'image qu'il donne est formée par réflexion. Le faisceau de lumière qui vient de l'objet, tombe sur un petit miroir plan de métal m m′, et se trouve ainsi renvoyé par la réflexion sur le miroir concave M M′; c'est après cette seconde réflexion qu'il va former près de l'oculaire une image réelle et amplifiée de l'objet.

Les oculaires sont exactement les mêmes que ceux du microscope dioptrique, *Fig.* 251 à 256.

M. Amici travaille les miroirs, et surtout le miroir elliptique M M′ avec une perfection que personne n'a pu atteindre jusqu'à présent. Cependant, les grossissemens de quatre ou cinq cents fois ne sont pas aussi purs dans cet instrument que dans le précédent.

565. *Détermination des indices de réfraction des li-*

quides et des corps mous translucides, au moyen du microscope. Nous pouvons expliquer maintenant le moyen très-ingénieux que le docteur Brewster a imaginé pour trouver les indices de réfraction, au moyen du microscope (529, 3°). Supposons que l'on ait formé avec de l'eau, dont l'indice de réfraction est n', un ménisque plan concave dont la distance focale principale soit f', et le rayon de courbure r', nous savons (535) qu'entre les trois quantités f', r' et n', il existe la relation

$$f' = \frac{r'}{n' - 1}.$$

Pour une autre substance dont l'indice de réfraction serait n'', la distance focale principale serait f'', le rayon de courbure r' restant le même, et l'on aurait

$$f'' = \frac{r'}{n'' - 1}.$$

Il en résulte

$$\frac{n'' - 1}{n' - 1} = \frac{f'}{f''}$$

Et par conséquent

$$n'' = 1 + (n' - 1)\,\frac{f'}{f''}.$$

Comme on connaît la valeur n' de l'indice de réfraction de l'eau, il reste, pour avoir n'', à déterminer le rapport $\frac{f'}{f''}$.

D'abord, pour former des ménisques de diverses substances qui soient tous plans concaves et de même rayon de courbure, il suffit de placer un fragment de ces diverses substances sur un verre plan à faces parallèles, et ensuite d'exercer une pression avec une lentille convexe, au point que le sommet de la convexité touche presque la surface du plan, *Fig.* 259 *bis.*

Or, si, pour faire cette expérience, on prend la lentille objective d'un microscope, et qu'on la reporte ensuite à l'instrument pour faire successivement trois observations sur un objet quelconque, la première avec la lentille seule et isolée, la deuxième avec la même lentille et un ménisque d'eau, et la troisième avec la même lentille encore et un ménisque d'une substance quelconque, de cire, par exemple, on pourra facilement en déduire l'indice de réfraction de la cire. En effet, soit B, B', et B'', la distance de l'objectif à l'objet dans la première, la deuxième et la troisième observation; soient F_I, F_I' et $F^{I''}$ les distances focales principales de la lentille objective seule, de la lentille objective avec le ménisque d'eau et de la lentille objective avec le ménisque de cire; soit, enfin, M la distance à laquelle l'image se forme derrière l'objectif, distance qui reste la même dans les trois cas. On a évidemment, pour la première observation

$$\frac{1}{M} = \frac{1}{F_I} + \frac{1}{B}$$

et pour la deuxième

$$\frac{1}{M} = \frac{1}{F_I'} + \frac{1}{B'}$$

Mais F_I' étant la distance focale principale du système, lentille et ménisque d'eau, il est clair que si l'on mettait un point lumineux à une distance F_I' au-devant du ménisque d'eau seul, le point lumineux formerait son image en une distance F_I; et puisque nous avons supposé que F' était la distance focale principale du ménisque d'eau seul, on aura

$$\frac{1}{F_I} = \frac{1}{F'} + \frac{1}{F_I'}$$

Cette équation, combinée avec les deux précédentes, donne

$$\frac{1}{F'} = \frac{1}{B'} - \frac{1}{B}$$

La première et la troisième observation, combinées de la même manière, donneront pareillement

$$\frac{1}{F''} = \frac{1}{B''} - \frac{1}{B}$$

Et par conséquent,

$$\frac{F'}{F''} = \frac{(B'' - B)}{(B' - B)} \cdot \frac{B'}{B''}$$

En substituant cette valeur dans l'expression précédente, on en tire enfin

$$N'' = 1 + (N' - 1)\left(\frac{B'' - B}{B' - B}\right) \cdot \frac{B'}{B''}$$

Il suffit donc d'observer avec assez d'exactitude les trois distances B, B', et B'', pour en déduire la valeur numérique de N'', ou de l'indice de réfraction d'une substance quelconque, pourvu que cette substance puisse être moulée en ménisque plan concave, et qu'elle offre alors assez de transparence.

TÉLESCOPES.

La pièce essentielle de tous les télescopes est un grand miroir concave de métal qui est tourné vers l'objet et qui en donne une image réelle et renversée d'après les lois dont nous avons précédemment parlé (522); mais comme il y a diverses manières d'observer cette image, il en résulte divers instrumens que nous allons successivement examiner.

566. *Télescope de Grégory*. Le grand miroir concave $M M'$, *Fig.* 240, est percé en son centre de figure d'une ou-

verture circulaire c c′. Les rayons incidens L L′ vont former en *m m′* une image réelle et renversée de l'objet. Cette image tombe au-devant du petit miroir concave v, à une distance un peu plus grande que la moitié du rayon; alors elle devient comme un objet, et donne naissance à une seconde image redressée, qui est renvoyée dans l'ouverture c c′. Là un oculaire la reçoit pour l'amplifier encore, et l'œil la regarde en o; une grande vis s s′ dont le bouton est B, sert à éloigner ou à rapprocher le miroir v suivant que l'objet qu'on observe est plus près ou plus loin.

Cet instrument fut imaginé par Grégory avant 1663. (*Optica promata.*)

567. *Télescope de Cassegrain.* Au petit miroir concave v de Grégory, Cassegrain substitue un petit miroir convexe x, *Fig.* 241, qui doit recevoir les rayons *avant* qu'ils aient formé l'image réelle de l'objet. Alors les rayons sont non-seulement réfléchis, mais leur convergence est diminuée, et l'image réelle et renversée, vient se former au même lieu que la seconde image du télescope de Grégory; là elle est reçue sur l'oculaire, et l'œil l'observe comme dans le cas précédent.

Ce télescope a sur le premier l'avantage d'être plus court et d'être moins exposé aux aberrations de sphéricité.

568. *Télescope de Newton.* Au lieu d'un petit miroir concave ou convexe, Newton emploie un petit miroir plan P, *Fig.* 242, qui reçoit le faisceau sous un angle de 45° pour projeter l'image réelle latéralement sur un oculaire semblable aux précédens. Dans quelques-uns des instrumens que Newton avait construits lui-même, il avait substitué au miroir plan de métal, un prisme rectangulaire tout-à-fait semblable à celui qui se trouve dans le microscope d'Amici.

LUNETTES.

569. *Lunette de Galilée* ou *lunette de spectacle.* Cette lu-

nette se compose d'un objectif convergent B B', *Fig.* 244, et d'un oculaire divergent R R'; au sortir de l'objectif, les rayons s'en iraient former une image réelle et renversée de l'objet en $m\,m'$; mais l'oculaire les reçoit avant le point de concours, et il doit être tellement placé qu'il leur imprime une divergence appropriée à la portée de la vue. On admet, en général, que les objets éloignés sont vus par des rayons sensiblement parallèles, soit qu'on les regarde à l'œil nu, soit qu'on regarde leurs images avec des verres; ainsi l'oculaire doit être placé en avant de l'image $m\,m'$ à une distance égale à sa distance focale principale; car c'est à cette condition seulement, qu'il pourra rendre parallèles entre eux les rayons qui convergent vers le même point de cette image; par conséquent si des points m et m' l'on mène au centre optique C de l'oculaire, les lignes m C et m'C, les pinceaux qui concourraient en m et m' deviendront au sortir de l'oculaire, l'un parallèle à m C, l'autre parallèle à m' C, et l'objet sera vu sous l'angle m C m'; à l'œil nu, il serait vu sous l'angle m A m', l'amplification est donc A F divisé par C F, c'est-à-dire qu'elle est égale à la distance focale principale de l'objectif divisée par la distance focale principale de l'oculaire. Cette amplification est seulement celle qui appartient aux objets très-éloignés; celle des objets plus rapprochés en diffère très-sensiblement.

Cette lunette donne des images droites des objets, et n'a pour longueur que la différence des distances focales de l'objectif et de l'oculaire. C'est ce double avantage qui l'a fait préférer aux autres lunettes pour tous les usages habituels et particulièrement pour le spectacle. Elle fut inventée vers 1610; les uns en attribuent la découverte à un nommé Jacques Métius; les autres supposent qu'on la doit aux enfans d'un fabricant de besicles de Midlebourg, qui auraient par hasard disposé à la suite l'un de l'autre, un verre de presbyte et un verre de myope, pour regarder le coq d'un clocher. Quoi qu'il en soit de cette première

origine, il est certain que vers l'an 1609 on avait trouvé à Midlebourg un moyen de voir les objets éloignés comme s'ils étaient près; le bruit s'en répandit en France et en Italie. Galilée était alors à Venise, et cette simple annonce fut un trait de lumière pour son génie; il se hâta de combiner des verres, et quelques nuits s'étaient à peine écoulées, qu'il avait déjà un instrument assez parfait pour découvrir les phases de Vénus, les satellites de Jupiter, les taches du soleil, etc., et pour trouver enfin dans les profondeurs du ciel les preuves fondamentales du système du monde et toutes ces grandes vérités qui semblaient inaccessibles à l'esprit humain. (*Nuncius sidereus*, 1610.)

570. *Lunette astronomique.* Elle se compose d'un objectif convergent B B' et d'un oculaire pareillement convergent R R' (*Fig.* 245). Au foyer de l'objectif en m m' se forme une image réelle et renversée de l'objet, et l'oculaire est une simple loupe avec laquelle on regarde cette image; il en résulte :

1° Que l'image reste renversée;

2° Que la longueur de la lunette est sensiblement égale à la somme des distances focales principales de l'objectif et de l'oculaire;

3° Que l'amplification est égale à la distance focale principale de l'objectif divisée par la distance focale principale de l'oculaire.

Cette lunette a été décrite pour la première fois par Kepler dans sa Dioptrique (en 1611); mais il paraît qu'elle ne fut exécutée que 20 ou 30 ans plus tard par le Père Scheiner (*Rosa ursina*, 1650).

571. *Lunette terrestre.* L'objectif de la lunette terrestre est le même que les précédens; mais son oculaire (*Fig.* 247) est disposé pour remplir surtout deux conditions, 1° pour redresser l'image renversée m m' que donne l'objectif, 2° pour diminuer autant qu'il est possible toutes les aberrations de l'instrument. C'est pourquoi on le

compose de quatre verres, O, P, Q, R; les deux premiers O et P sont uniquement destinés à redresser l'image, et les deux dernier forment un oculaire composé, tout-à-fait pareil à l'oculaire du microscope, dont nous avons parlé précédemment. Il est nécessaire de disposer des diaphragmes en G et G′ pour arrêter les rayons des bords qui troubleraient inévitablement la netteté des images.

La perfection de ces instrumens est surtout dépendante du travail de l'objectif; car, si la première image est à la fois parfaitement achromatique, bien distincte et vivement éclairée, il sera facile de construire des oculaires, pour la redresser et l'amplifier sans lui faire subir d'altération sensible. L'achromatisme dépend, comme nous l'avons vu (547), des indices de réfraction et des rapports de dispersion des substances qui composent l'objectif; la distinction dépend de la pureté de la matière et surtout de la courbure des surfaces; enfin la clarté dépend de l'ouverture de l'objectif et de sa distance focale principale. C'est la clarté de l'image qui permet une amplification plus ou moins grande. Et voici sur ce point quels sont en général les résultats de la pratique.

Ouvertures de l'objectif.	Distances focales principales.	Amplifications.
1. . . 13 lignes. . .	9 pouces. . .	15 fois.
2. . . 16.	14.	18
3. . . 20.	19.	22
4. . . 25.	30.	30
5. . . 32.	42.	36
6. . . 48.	30.	200
7. . . 60.	72.	600
8. . . 72.	84.	400 à 900
9. . . 96.	144.	400 à 900
10. . . 132.	216.	600 à 900

Ainsi tout annonce que pour obtenir des grossissemens

de 1000 fois il faudrait pouvoir travailler avec une grande perfection des objectifs achromatiques qui auraient plus d'un pied d'ouverture. Mais lorsqu'on réfléchit aux difficultés prodigieuses que présente ce travail, on doit déjà regarder comme des chefs-d'œuvre de l'art les grands objectifs que MM. Cauchoix et Lerebours sont parvenus à construire dans ces dernières années. Sans doute ces puissans instrumens dont ils ont enrichi la science ne tarderont pas, entre les mains de nos astronomes, à donner des résultats du plus haut intérêt, soit sur la constitution physique des planètes, soit sur ces mouvemens remarquables des étoiles doubles qui ont déjà été observés avec tant de soins par MM. Herschell et South.

FIN DE LA PREMIÈRE PARTIE DU DEUXIÈME VOLUME.

TABLE

DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LA PREMIÈRE PARTIE DU DEUXIÈME VOLUME.

LIVRE SIXIÈME.

DES ACTIONS MOLÉCULAIRES.

NOTIONS GÉNÉRALES. . . . . Pag. 1
CHAP. I. — Capillarité. 3
CHAP. II. — De la structure des corps 38
CHAP. III. — De l'élasticité. 58

LIVRE SEPTIÈME.

ACOUSTIQUE.

CHAP. I. — De la production du son et de sa transmission dans l'air atmosphérique. 96
CHAP. I. — Évaluation numérique des sons par les vibrations des cordes, des tuyaux cylindriques, des lames et de la sirène. 111
CHAP. III. — Vibrations des cordes. 132
CHAP. IV. — Du mouvement de vibrations des masses fluides. 165
CHAP. V. — Des vibrations dans quelques instrumens de musique. 176
CHAP. VI. — De la vitesse du son dans les différens milieux. 183
CHAP. VII. — De la voix et de l'ouïe. 194

LIVRE HUITIÈME.

OPTIQUE.

Notions générales sur la propagation de la lumière . . Pag. 202

PREMIÈRE PARTIE.

LUMIÈRE NON POLARISÉE.

CHAP. I. — De la catoptrique ou de la réflexion de la lumière 218
CHAP. II. — Dioptrique ou réfraction de la lumiere. . . . 235
CHAP. III. — De la décomposition et de la recomposition de la lumière. 283
CHAP. IV. — Des raies du spectre, de la dispersion et de l'achromatisme. 305
CHAP. V. — De la vision et des instrumens d'optique. . . 325

FIN DE LA TABLE DE LA PREMIÈRE PARTIE DU DEUXIÈME VOLUME.

ERRATA DU DEUXIÈME VOLUME.

PREMIÈRE PARTIE.

Page 5, lig. 31, PP, *lisez* PP'.
8. 28, A'S *lisez* A' S'.
19. 15, plus grande, *lisez* moindre.
16, moindre, *lisez* plus grande.
20. 27, entr, *lisez* entre.
32. 33, endesmos, *lisez* endosmose.
17. 2, capable de mouiller, *lisez* qui puisse être mouillée par.
68. 12, *cr*, *lisez* C *r*.
71. 1, A' *lisez* R'.
80. 1, (Fig. 46), *lisez* (Fig. 45 bis).
82. 8, 36k *lisez* 36k.
82. 8, (Fig. 47), *lisez* (Fig. 46).
85. 14, 2e cas, *lisez* 2e cas.
85. 34, 3, *lisez* 3e.
86. 33, es duré es, *lisez* les durées.
104. 8, en S' P Q R A, *lisez* en S P Q R A.
104. 35, et tout, *lisez* et tous.
112. 13, $\frac{3}{2}, \frac{4}{3}, \frac{5}{}$ *lisez* $\frac{3}{2}, \frac{4}{3}, \frac{5}{4}$.
114. 13, $\frac{5}{5}$ *lisez* $\frac{5}{3}$.
116. 30, santillent, *lisez* sautillent.
143. 28, indentiquement, *lisez* identiquement.
144. 30, (Fig. 91); dans sa circonférence, il est facile, *lisez* (Fig. 91) dans sa circonférence; il est facile, etc.
186. 4, de quantité, *lisez* de la quantité.
192. 30, $\frac{25}{2}$ *lisez* $\frac{2^5}{2}$
195. 12, quefois, *lisez* quelquefois.
211. 33, A A *lisez* A A'.
230 18, $M = \frac{R}{2} R$, *lisez* $M = \frac{R}{2}$
231. 26, Fig. 155, *lisez* Fig. 158 bis.
231. 28, M M', *lisez* *m m'*.
236. 34, F' C, *lisez* R' C.
237. 7, $\frac{\text{Sin.}}{\text{Sin. S}}$ *lisez* $\frac{\text{Sin. S}}{\text{Sin. P}}$
239. 20, A B C D, ajoutez Fig. 171 bis.
240. 4, limite, *lisez* limité.
246. 23, fair, *lisez* faire.
251. 21, maxiemum, *lisez* maximum.
254. 14, cire 17°,5, *lisez* cire 17°,5.
255. 11, opole, *lisez* opale.
257. 34, Fig. 188, *lisez* Fig. 186.

ERRATA.

Pag. 259. lig. 20, A B D, ajoutez Fig. 182.

272. 34, Fig. 179, *lisez* Fig. 197.

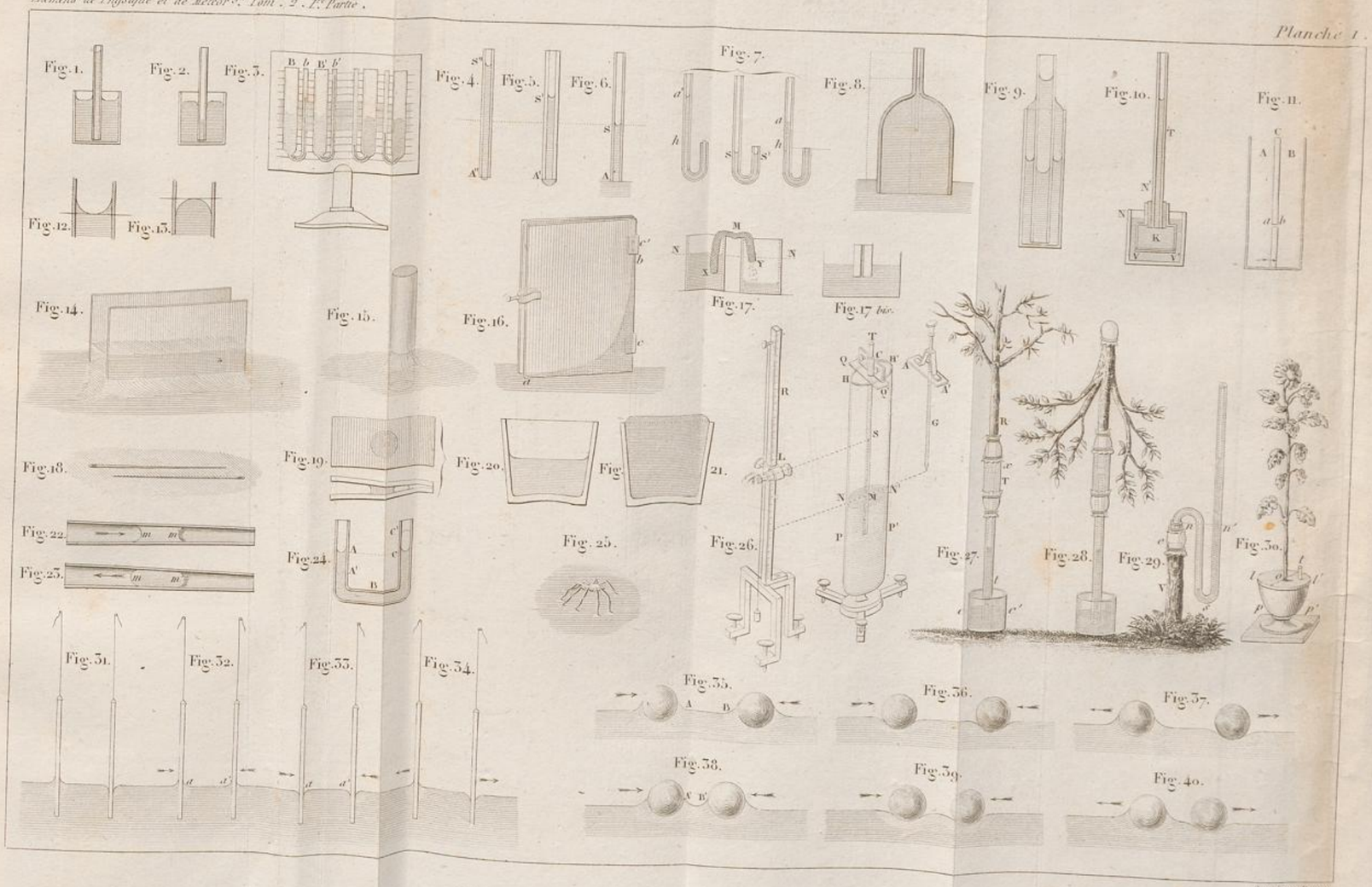
272. 26, le, *lisez* la.

278. 10, haute t, *lisez* haut et.

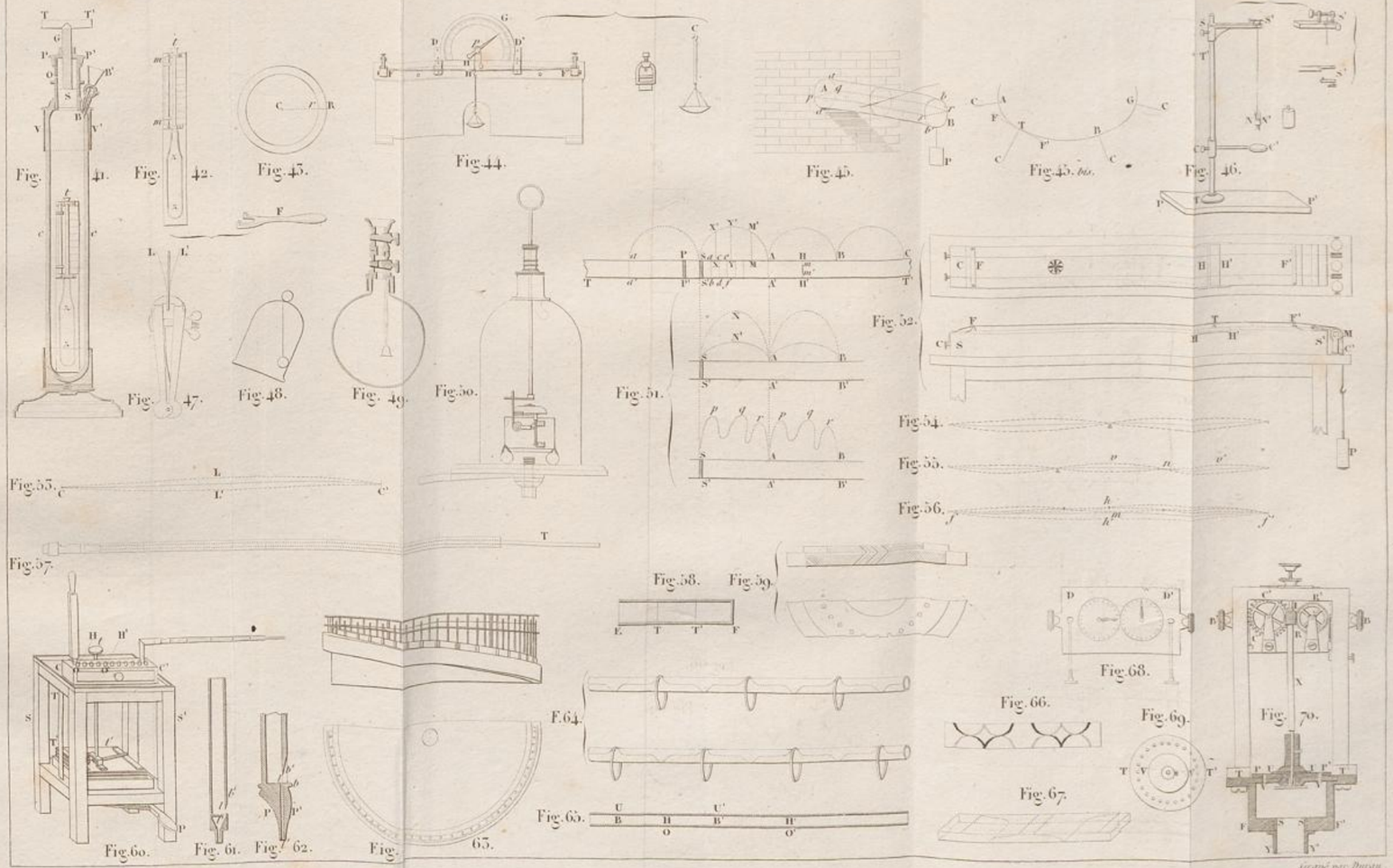
278 12, $F = \frac{R\,R'}{(N-1)(R'\ R)}$, *lisez* $F = \frac{R\,R'}{(N-1)\ (R'-R)}$.

280. 1 et 2, alors, alors, *lisez* alors.

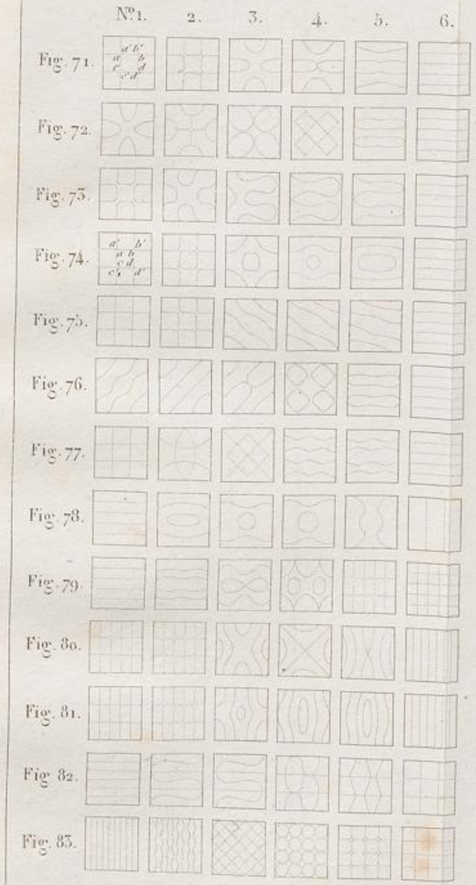
321
322
323 Dans les formules que contiennent ces pages, les indices de plusieurs lettres ont été dérangés pendant le tirage; on trouvera, par exemple, N'7 ou N'7 au lieu de N'7. Les chiffres servant d'indices n'indiquent jamais des puissances, et il faut toujours supposer qu'ils sont au bas de la lettre de cette manière F'1, N'1, N'7.

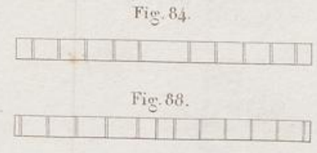


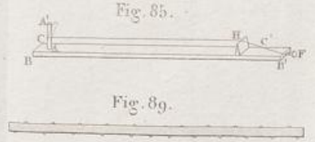
Gravé par Durand

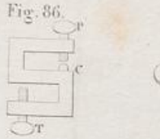


Gravé par Pausin.

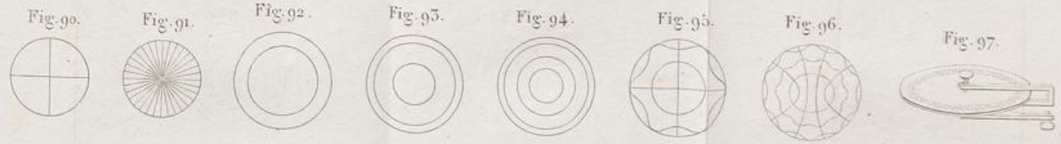


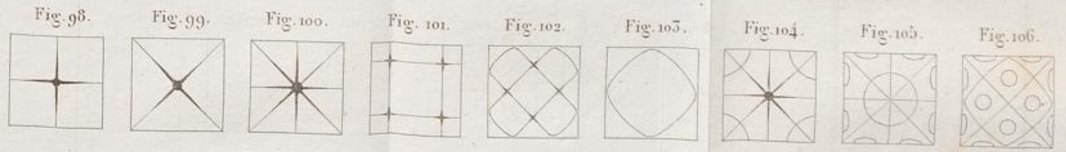


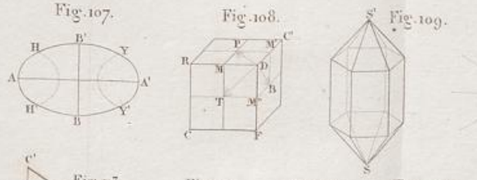


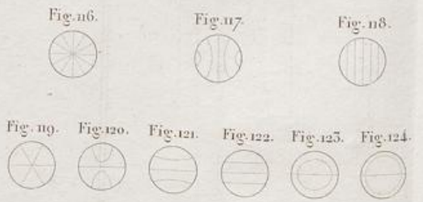


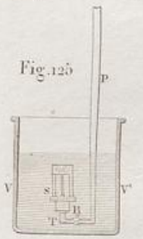


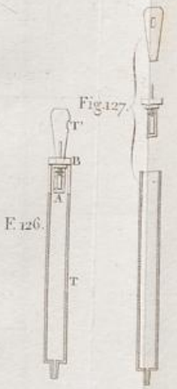


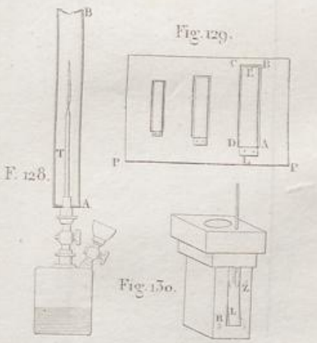




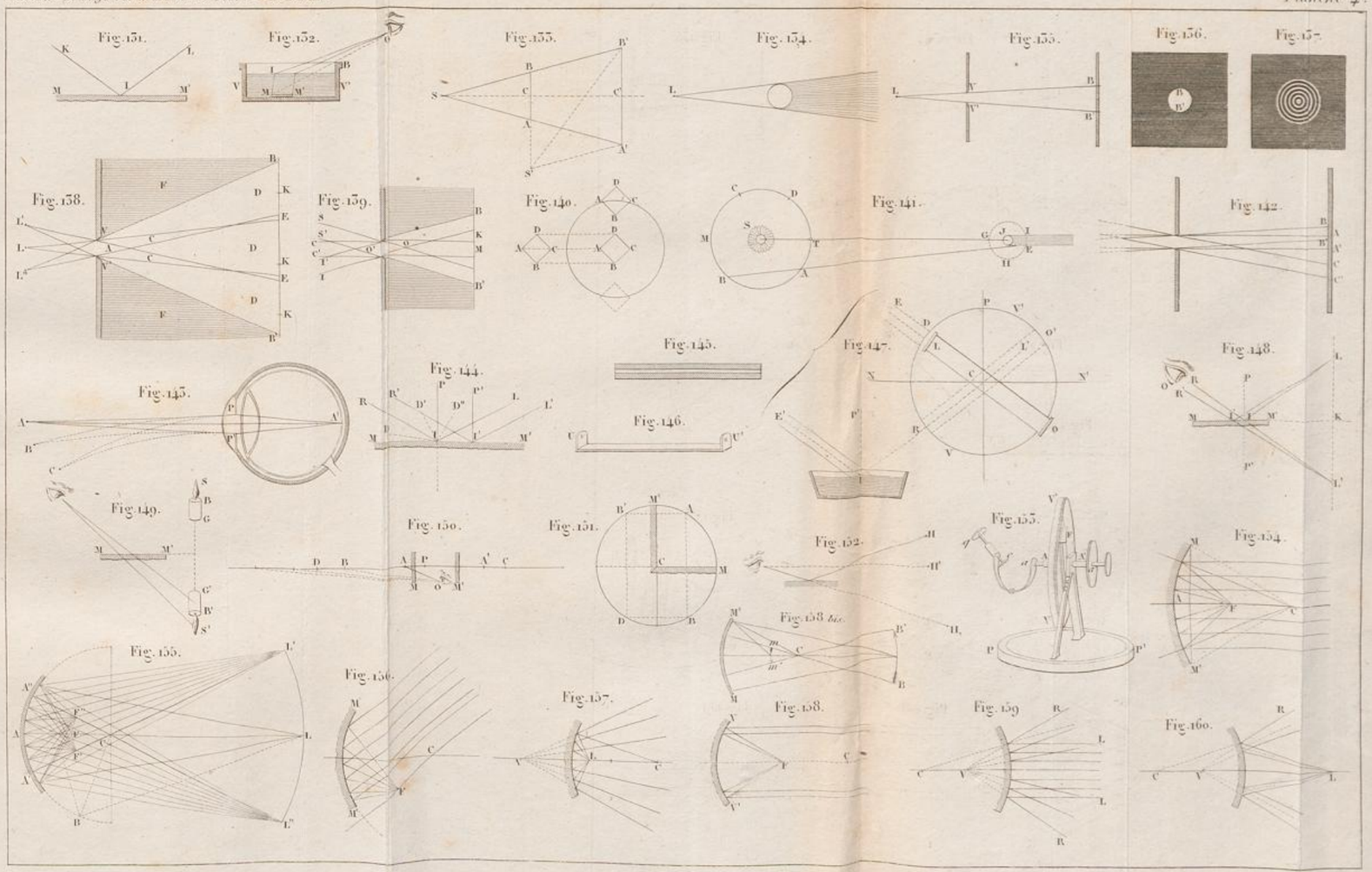




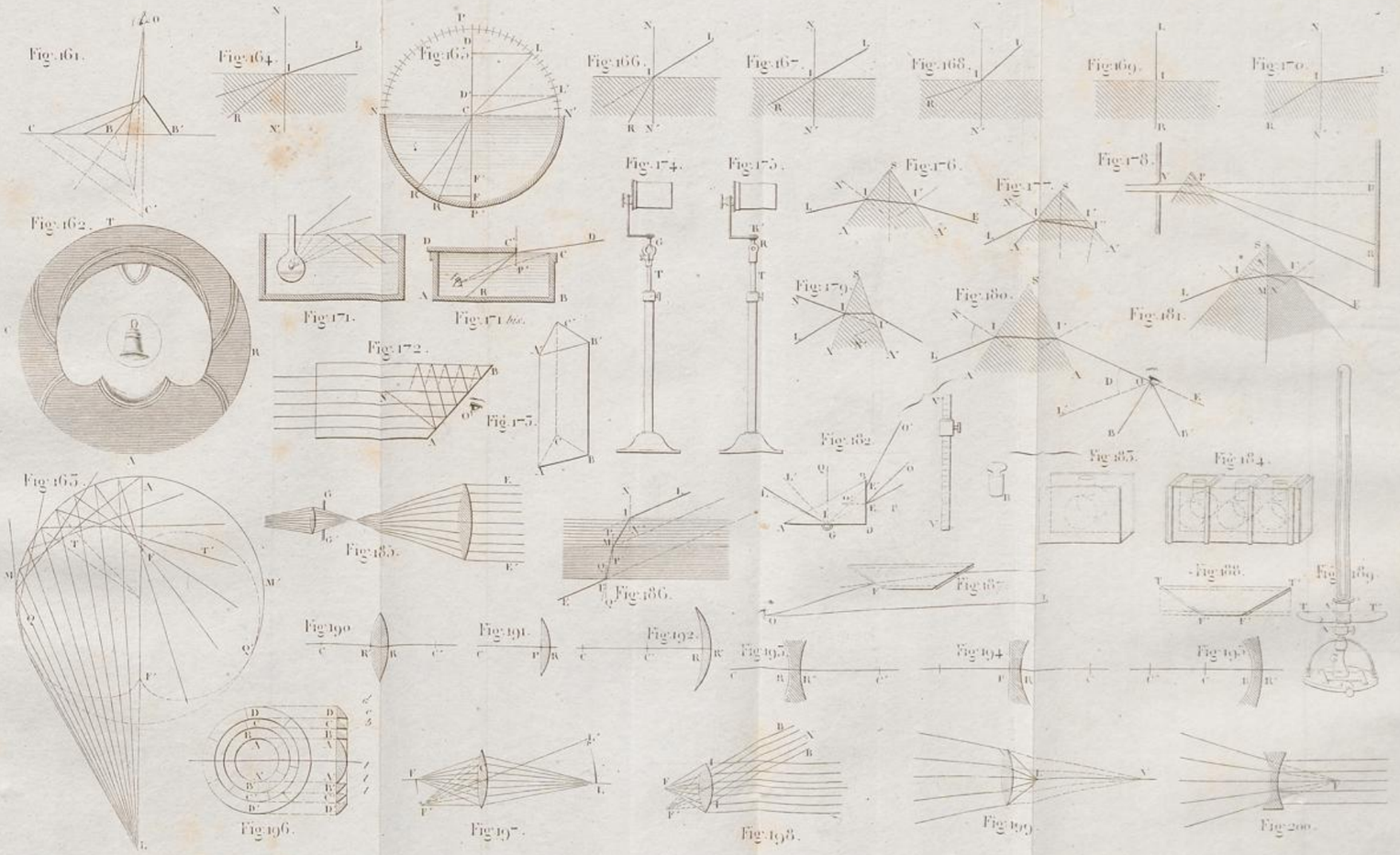




Gravé par Pariset.



Gravé par Durau



Gravé par Le Blanc.

Fig. 201.

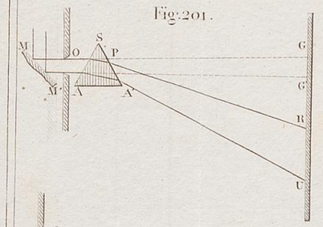


Fig. 202.



Fig. 203.

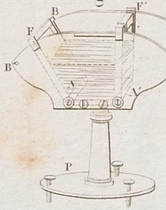


Fig. 204.



Fig. 205.



Fig. 206.



Fig. 207.

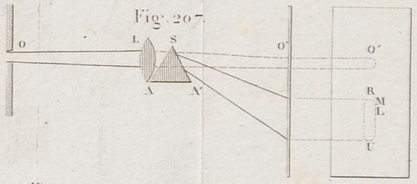


Fig. 208.

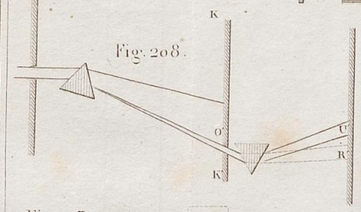


Fig. 209.

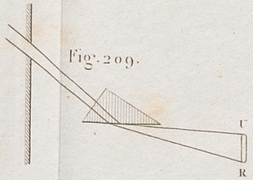


Fig. 210.

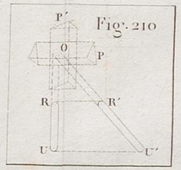


Fig. 211.

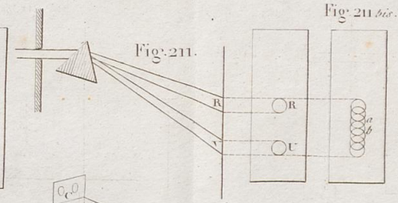


Fig. 211 bis.

Fig. 212.

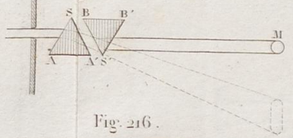


Fig. 213.

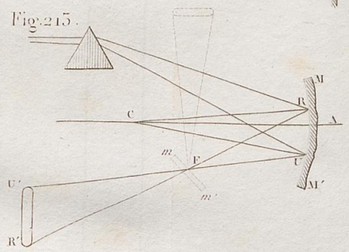


Fig. 214.

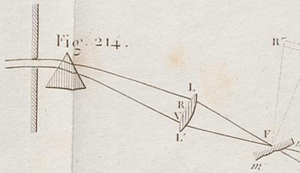


Fig. 215.



Fig. 215 bis.

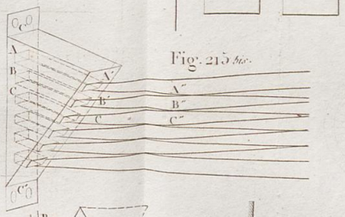


Fig. 216.

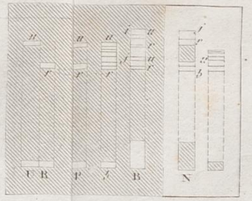


Fig. 217.

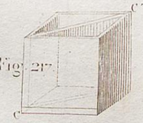


Fig. 218.

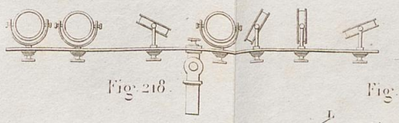


Fig. 219.

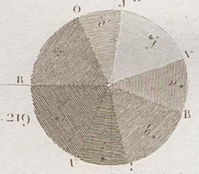


Fig. 220.

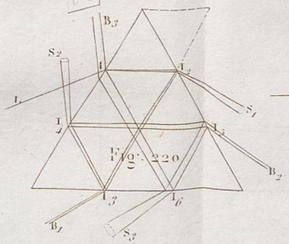


Fig. 221.

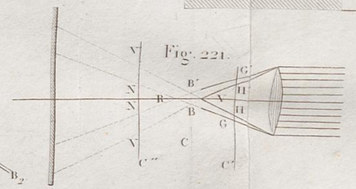


Fig. 222.



Fig. 223.

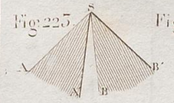


Fig. 224.

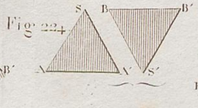


Fig. 225.

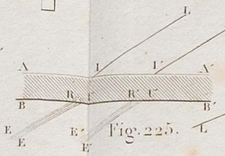


Fig. 226.

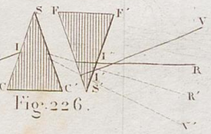


Fig. 227.

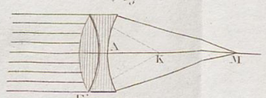


Fig. 228.

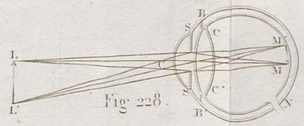
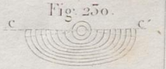
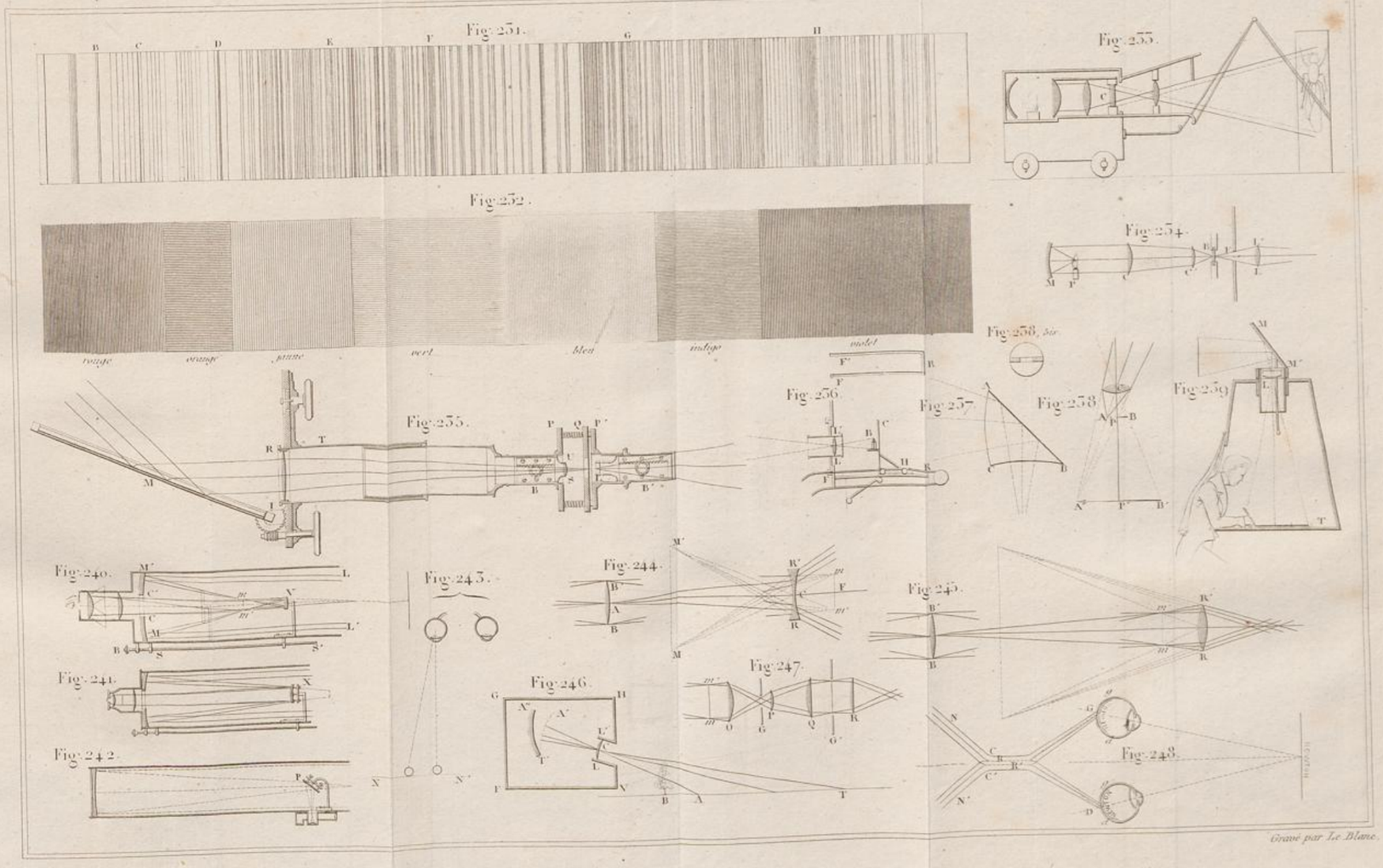


Fig. 229.

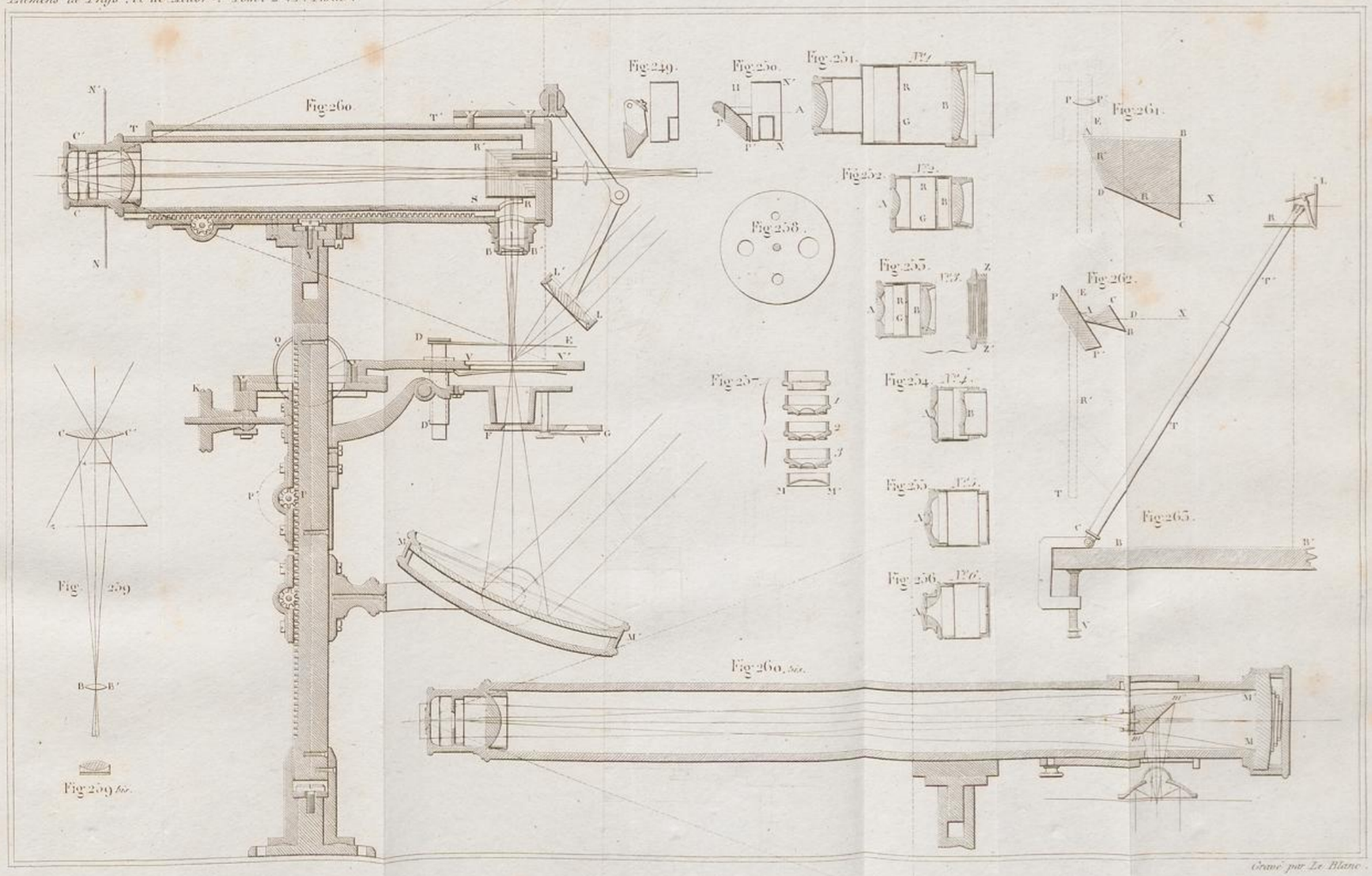


Fig. 230.





Gravé par Le Blanc.



Gravé par Le Blanc.

ETH Zürich
Bibliothek

Abt.	T	Nummer	U	Band	Teil	Aufl.	E	S	
7		78136		2	1 (*				

BUCHKARTE
Bitte nicht herausnehmen!

34256 12/72