

Capteurs, imageurs et instrumentation

ANALYSE, BILAN ET IMPACT DES PROJETS
FINANCÉS SUR LA PÉRIODE 2018-2023

Les cahiers de l'ANR
NUMÉRO 18 – MARS 2025





Les cahiers de l'ANR traitent de questions thématiques transverses aux différents appels à projets financés par l'Agence nationale de la recherche (ANR). Cette collection, qui existe depuis 2009, met en perspective les recherches, les innovations et les avancées en cours dans un domaine spécifique. Sans prétention d'exhaustivité, son objectif est de revenir sur les enjeux sociétaux et les défis d'avenir identifiés par les communautés de recherche mobilisées sur une thématique. *Les cahiers de l'ANR* s'adressent aussi bien aux chercheurs qu'aux décideurs politiques et au grand public.

Le présent cahier a pour thème principal l'instrumentation scientifique. Il fait référence aux différents projets de recherche financés par l'ANR et France 2030 dans ce domaine. Ce cahier, le 18^e de la collection, a été coordonné par Bertrand Fourcade, responsable scientifique, et Liz Pons, adjointe au responsable du département Sciences Physiques, Ingénierie, Chimie et Énergie, en collaboration avec la Direction de l'information et de la communication, la Direction de la stratégie numérique et des données et la Direction des grands programmes d'investissement de l'État.

Nous remercions les coordinateurs et les coordinatrices des projets présentés dans ce cahier ainsi que les personnes qui ont contribué à son écriture et à sa relecture.

Direction de la publication : Claire Giry, Présidente-directrice générale

Direction de la rédaction : Fabrice Impériali

Conception et coordination scientifique : Bertrand Fourcade et Liz Pons

Rédaction : Pascal Bain, Dominique Daloz, Daniela Floriani, Bertrand Fourcade, Gabrielle Lacombe, Thamières Moreira, Ariane Pinto, Liz Pons, Philippe Saintavit

Analyse des données : Direction de la stratégie numérique et des données, pôle études, bilans, impact ; Nathan Cantat, Patrick Éparvier

Coordination éditoriale : Nathalie Mamosa

Conception graphique : Laurent Wachoru - **Impression :** Reprotechnique

Photo de couverture : © Adobe Stock

ISSN 2258-9309



L'instrumentation scientifique : un domaine au cœur de l'innovation et de la compréhension des phénomènes complexes

Claire Giry

Présidente-directrice générale de l'ANR

Détecter, analyser ou moduler avec précision les phénomènes chimiques, physiques et biologiques est essentiel pour relever ces défis à différentes échelles, où émergent de nouveaux effets et processus.

L'axe de recherche « Capteurs, imageurs et instrumentation » de l'Appel à projets générique (AAPG), principal appel de l'Agence nationale de la recherche (ANR), soutient le développement d'instruments de caractérisation à différentes échelles, avec des applications en physique, biologie, santé et environnement.

Ce dix-huitième *cahier de l'ANR* dresse le bilan des financements et thématiques soutenues dans ce domaine, mettant en lumière les dynamiques scientifiques et méthodologiques issues des projets financés entre 2018 et 2023 dans le cadre de l'AAPG et de France 2030. Il explore, à travers quatre grandes thématiques transversales, les approches innovantes développées pour l'imagerie, la détection et l'analyse du

vivant, en intégrant notamment les avancées en microscopie et imagerie spectroscopique nanométrique, les technologies THz et peignes de fréquence dans des milieux complexes, ainsi que les capteurs et détecteurs de nouvelle génération.

Une sélection de projets illustre ces avancées scientifiques majeures, qu'il s'agisse de l'imagerie du vivant à l'échelle nanométrique ou du développement de capteurs de pointe. Les vingt exemples présentés témoignent du dynamisme et de la diversité de la recherche dans ce domaine. En intégrant des approches innovantes et des technologies de rupture, ces travaux contribuent à repousser les frontières de l'observation et de la caractérisation, ouvrant la voie à de nouvelles perspectives scientifiques et industrielles.

Ce *cahier de l'ANR* souligne ainsi le rôle clé de l'instrumentation comme moteur d'innovation et levier essentiel pour répondre aux grands enjeux scientifiques d'aujourd'hui et de demain.

Sommaire

P. 06

**Partie 1 | L'AXE « CAPTEURS, IMAGEURS ET INSTRUMENTATION »
AU SEIN DE L'APPEL À PROJETS GÉNÉRIQUE (AAPG)**

P. 20

**Partie 2 | LE FINANCEMENT DES PROJETS « CAPTEURS »
AU SEIN DE FRANCE 2030**

P. 27

Partie 3 | LA PRODUCTION SCIENTIFIQUE

P. 31

**Partie 4 | SÉLECTION DE PROJETS FINANCÉS PAR L'AXE « CAPTEURS, IMAGEURS
ET INSTRUMENTATION » DE L'APPEL À PROJETS GÉNÉRIQUE**

P. 43

**Annexe | LISTE DES PROJETS FINANCÉS PAR L'AXE « CAPTEURS, IMAGEURS
ET INSTRUMENTATION » DE L'APPEL À PROJETS GÉNÉRIQUE**

Introduction

Bertrand Fourcade

Responsable scientifique à l'ANR

L'instrumentation scientifique joue un rôle clé dans l'exploration et la compréhension des phénomènes chimiques, physiques et biologiques. Les avancées dans ce domaine reposent sur le développement de solutions innovantes, capables de détecter, analyser ou moduler ces phénomènes avec une précision toujours accrue.

C'est dans cette perspective que l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation » est mis en place en 2018 dans le cadre de l'Appel à projets générique (AAPG) de l'ANR, avec pour mission de soutenir des projets proposant de nouveaux principes de détection et d'analyse.

France 2030 apporte également un soutien important à des projets spécifiquement dédiés à l'instrumentation, renforçant ainsi le développement de technologies de pointe dans la recherche.

L'ensemble des projets financés tant par le plan d'action de l'ANR que France 2030 témoigne d'un intérêt marqué pour les nanosciences et les nanotechnologies, tendance que l'on observe au niveau de tous les axes. Cette évolution s'explique par le fait que, à des échelles de plus en plus petites, de nouveaux effets physiques et processus chimiques

émergent et deviennent exploitables. Initialement centrées sur la microélectronique, leurs applications se sont étendues à des domaines variés comme la biologie-santé, l'énergie ou les procédés de mise en forme des matériaux.

La plupart des avancées résultent de la capacité à observer, manipuler et interagir à des échelles réduites via différentes techniques : sondes à balayage associées à la microscopie électronique, nouvelles imageries spectroscopiques, manipulation de front d'onde optique, nouvelles fenêtres d'observation dans le THz, outils de lithographies pour ciser la matière, etc. La multiplication des capteurs multiphysiques dans les systèmes, que ce soit pour la métrologie, la mise en forme des bâtiments ou des matériaux implique aussi le développement de méthodes adaptées. Pour finir, la mesure, qu'elle soit physique ou chimique, fait évidemment partie de tous les axes scientifiques de l'Appel à projets générique. Tout en s'appuyant sur une question scientifique claire, les projets mentionnés par la suite font néanmoins une large place au développement d'une chaîne de mesure et de caractérisation montrant une progression par rapport à l'état de l'art. L'imagerie médicale et les capteurs quantiques sont ici exclus.

Partie 1

L'AXE « CAPTEURS, IMAGEURS ET INSTRUMENTATION » AU SEIN DE L'APPEL À PROJETS GÉNÉRIQUE (AAPG)

Le Plan d'action de l'ANR est structuré en quatre composantes transversales, chacune d'entre elles disposant de budgets, d'appels à projets et de programmes spécifiques :

- L'Appel à projets générique (AAPG) existe depuis 2014 et est structuré en 57 axes de recherche pour l'édition 2025. Avant 2014, la programmation s'organisait autour d'appels thématiques et non thématiques (« programme Blanc »).
- Les appels spécifiques sont mis en place hors du calendrier habituel de l'AAPG afin de répondre à des besoins urgents de recherche, à une priorité décidée par l'État ou encore dans le but de mettre en compétition ou de faire collaborer des équipes de recherche afin de lever des verrous scientifiques ou technologiques majeurs : appels Flash, Challenges ou encore des appels comme Chlordécone et le programme PAUSE-ANR Ukraine.
- Les instruments de financement permettant aux équipes françaises de participer à des programmes européens et internationaux avec, entre autres, le Montage de réseaux scientifiques

européens ou internationaux (MRSEI), le Tremplin-ERC, les Initiatives de programmation conjointe européennes (JPI et Partnerships), Horizon Europe, Belmont Forum... De même, l'ANR met en place des appels à projets dédiés dans le cadre de collaborations bilatérales stratégiques pour l'État, telle que l'Appel franco-allemand en sciences humaines et sociales (FRAL).

Enfin, une composante de la programmation de l'ANR est axée sur le soutien à des projets de recherche partenariale public-privé et le transfert des résultats de la recherche publique vers le monde économique : programmes LabCom, Chaires industrielles, Instituts Carnot, ASTRID et ASTRID Maturation...

L'ANR est également le principal opérateur de France 2030 dans le domaine de l'enseignement supérieur et de la recherche. Lancé en 2010, il a pour objectifs généraux de stimuler l'emploi, renforcer la productivité et d'accroître la compétitivité des entreprises françaises en favorisant l'investissement et l'innovation dans des secteurs prioritaires, générateurs de croissance. La partie 2 est ainsi dédiée aux projets financés dans ce cadre.

Caractéristiques du corpus de projets étudiées

Depuis la création de l'Agence, des projets de recherche visant à renforcer l'innovation technologique dans le domaine des capteurs et de l'instrumentation ont été soutenus au travers d'appels à projets divers et de différents axes de l'Appel à projets générique (AAPG).

Ces projets portent soit sur des verrous de recherche fondamentale relevant de domaines disciplinaires comme les nanotechnologies ou nanosciences¹, soit sur la mise en application des capteurs dans des domaines variés, de l'environnement au numérique, en passant par la santé.

Historique de l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation »

Si l'on s'en tient uniquement à l'édition 2017 de l'AAPG, un an avant la mise en place de l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation », on constate que :

- le développement de capteurs pour la surveillance de l'environnement apparaît dans l'axe 4 du défi 1² « Innovations scientifiques et technologiques pour accompagner la transition écologique » où sont attendues des ruptures technologiques, numériques, économiques et méthodologiques, intégrant l'abaissement des coûts, la miniaturisation, l'autonomie, la fiabilité et la robustesse des capteurs en situation réelle ;

- le développement de capteurs (sensoriels, de perception), en vue d'améliorer l'adaptation du robot à une tâche donnée, est soutenu dans l'axe 1 du défi 3³ « Usine du futur : Homme, organisation, technologies » ;

- des projets sur les biocapteurs sont soutenus dans l'axe 3 « Chimie durable et procédés associés » du défi 3.

En 2018, un nouvel axe « Capteurs, instrumentation » est mis en place dans l'AAPG avec pour objectif de financer des projets dans le vaste domaine des capteurs et de l'instrumentation pour le suivi en ligne des procédés et caractéristiques des matériaux et plus généralement dans le domaine industriel. Il comprend trois grands thèmes :

- Méthodes de mesure et instrumentation : développement de caractérisation et de suivi en ligne des caractéristiques des matériaux fabriqués ; conception et utilisation pour le suivi de procédés, de capteurs où la partie sensible est de taille micrométrique ou supérieure (sans nanostructuration ou fonctionnalisation de surface de dimension nanométrique).

1. Défi 3 « Stimuler le nouveau industriel », axe « Nanomatériaux et nanotechnologies pour les produits du Futur » sur l'édition 2017.
2. Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique : vers une compréhension du changement global.
3. Stimuler le nouveau industriel.

- Caractérisation à l'échelle nanométrique : développement d'instrumentation dédiée à la caractérisation à l'échelle nanométrique répondant aux besoins de métrologie d'observation et de détection y compris dans les milieux complexes, fluides ou solides, dilués ou non. Les propriétés physiques sur lesquelles sont fondés ces instruments peuvent être de toute nature.

- Capteurs innovants à l'échelle nanométrique : projets sur la rupture apportée par l'échelle nanométrique aux performances des capteurs/actionneurs. Les projets doivent aller au-delà de la simple fabrication de matériaux et de la caractérisation de leur sensibilité à un paramètre (physique...) et envisager une intégration à des fins d'instrumentation.

Dans l'édition 2022 de l'Appel à projets générique, l'intitulé de l'axe devient « Capteurs, imageurs et instrumentation » afin d'être en phase avec les projets de recherche menés dans les laboratoires et de mieux tenir en compte de l'émergence de nouvelles techniques d'imagerie (optiques, acoustiques, champ proche, etc.).

Ainsi, l'objectif de cette partie est de faire un premier bilan des 147 projets sélectionnés entre 2018 et 2023 par le comité 42 (CE42) en charge de leur évaluation au sein de l'ANR et des cinq projets PRCI dont l'évaluation dépend d'accords internationaux et qui n'ont pas été évalués directement par l'ANR⁴. L'aide totale pour l'ensemble de ces projets s'élève à 63,5 millions d'euros. La liste des 152 projets est consultable en annexe.

Répartition annuelle des projets

La figure 1 retrace l'évolution du nombre de projets au cours des différentes éditions, ainsi que le budget alloué. L'augmentation du nombre de projets sélectionnés à partir de 2021 peut être corrélée à celle du budget de l'ANR qui a permis d'atteindre des taux de sélection au-delà de 22 %. La stagnation observée sur les deux éditions suivantes est le reflet direct de l'évolution du nombre de projets déposés. Afin d'en analyser les raisons, il convient de comparer cette évolution au nombre total de projets financés sur l'ensemble des comités.

Au niveau de l'AAPG, on constate une baisse sensible des dépôts à partir de 2018. Au sein du CE42 chargé de l'évaluation des projets de l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation », cette diminution semble plus marquée pour les projets sur les capteurs. Cela pourrait s'expliquer en partie par le fait que l'avancée des projets des éditions 2018 à 2021 a été fortement impactée par la crise sanitaire, engendrant des retards de livraison, un arrêt des expérimentations ou des difficultés de recrutement. Les projets où l'expérimentation est importante ont particulièrement été affectés.

Enfin, en examinant l'évolution du nombre de propositions soumises aux comités chargés d'évaluer des projets dans des domaines connexes, on constate que le CE42 s'est affirmé sans entraîner de variation significative du nombre de propositions dans les autres comités, à l'exception du CE09⁵, dont le flux de projets dédiés à l'instrumentation nano a été redirigé vers le CE42.

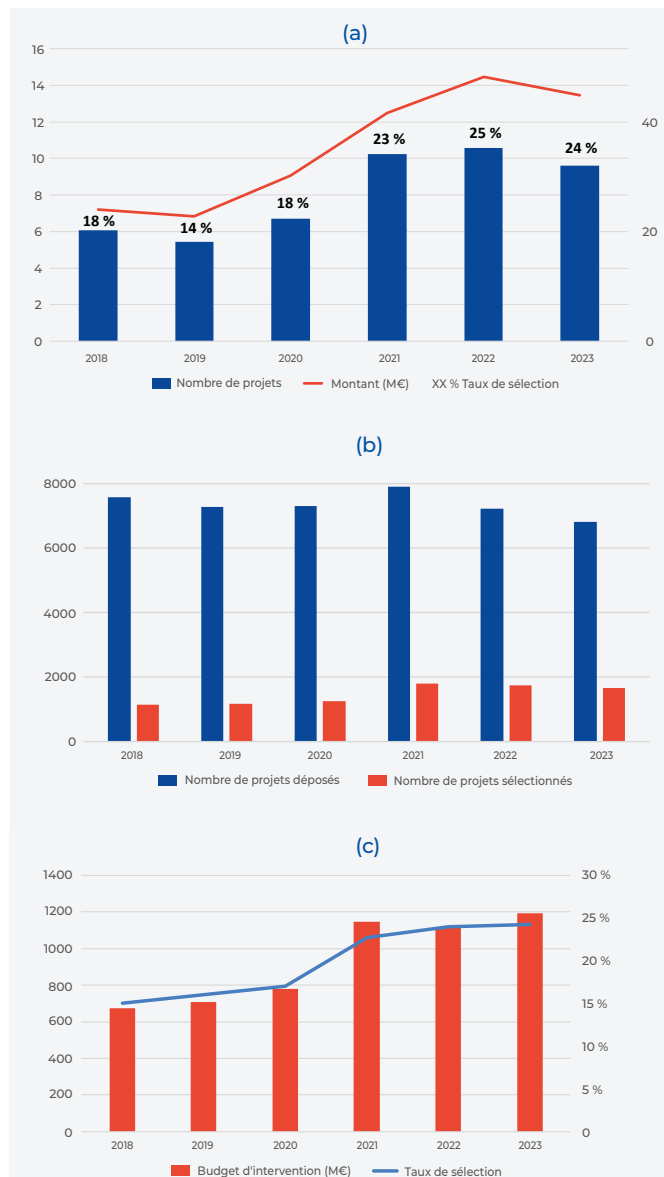


Figure 1. Répartition annuelle des 152 projets financés, des aides allouées (en M€) et du taux de sélection (a). Répartition annuelle des projets sélectionnés et déposés sur l'ensemble de l'AAPG (b), répartition du budget alloué et du taux de sélection sur l'ensemble de l'AAPG (c).

4. Projets sélectionnés par la DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) dans le cadre de la procédure de *Lead Agency*.

5. Comité intitulé « Nano-objets et nanomatériaux fonctionnels, interfaces » relatif à l'axe « Nanomatériaux et nanotechnologies pour les produits du Futur ».

Répartition des projets par instrument de financement

Les projets financés pendant cette période se répartissent entre les quatre types d'instruments (figure 2) :

- les projets de recherche collaborative entre laboratoires de recherche publique (PRC) ;
- les projets de recherche collaborative entre partenaires publics et privés (PRCE) ;
- les projets Jeunes Chercheurs - Jeunes Chercheuses (JCJC) ;
- les projets de recherche collaborative bilatéraux entre partenaires français et partenaires étrangers ayant demandé un financement à leur propre agence de financement et dont un accord de collaboration a été établi avec l'ANR (PRCI).

Si l'on regarde la répartition globale sur les six éditions (figure 2a), on constate qu'elle reflète celle, classique, d'un comité relativement attractif pour les entreprises, avec une proportion équilibrée de PRCE et de JCJC. Ensemble, ces deux instruments ont un poids comparable à celui de l'instrument PRC.

Cependant, la répartition évolue à partir de 2020 (figure 2b), puisqu'une part plus importante de PRC est financée par rapport aux JCJC et PRCE. Il convient toutefois de considérer ces évolutions avec prudence compte tenu du faible nombre de projets financés : entre trois et huit PRCE financés par an et entre quatre et sept JCJC.

Ainsi, l'augmentation du budget de l'ANR n'a pas conduit au financement d'un nombre plus élevé de PRCE et JCJC, par rapport au nombre de PRC, et ce, pour deux raisons différentes. Du côté de l'instrument JCJC, de nouvelles règles sont apparues d'année en année, afin que cet instrument soit spécifiquement destiné aux chercheurs et chercheuses récemment en poste dans leur laboratoire. Cela a eu pour conséquence de réduire les opportunités pour un chercheur de déposer un JCJC, notamment avec l'introduction en 2022 d'une limite fixée à cinq années de prise de fonction au sein du laboratoire. Il est probable que ce type de mesure ait amené certains jeunes scientifiques à opter pour le dépôt d'un projet PRC.

Concernant les projets PRCE, face à des taux de sélection plus élevés, il est presque certain que les laboratoires publics n'aient pas considéré l'implication d'un industriel dans leur projet comme un véritable avantage compétitif. Les PRCE, au nombre de 28, impliquent des développements avec au moins une entreprise du secteur privé dont la typologie est variée. On retrouve aussi bien des spin-off issus de laboratoires, comme AbbeLight ou MC2 Technologies, des start-ups, ou des groupes plus importants (Horiba, Thales, TotalEnergies, etc.). L'objectif est de développer une chaîne de mesure dans un contexte industriel et dont les contours varient en fonction des circonstances. Par exemple, un projet associé à un spin-off issu du laboratoire s'appuiera sur la technologie du laboratoire. Un projet avec une entreprise spécialisée en instrumentation peut développer un dispositif qui devra s'intégrer dans une chaîne existante, ce qui nécessite un développement de la part du partenaire. Les visées peuvent alors à la fois être commerciales, pour la vente d'un instrument, et fondamentales, pour la conception d'un nouvel instrument dans un autre projet académique. Enfin, on peut développer une instrumentation adaptée au contexte de la mesure, contexte qui diffère de celui des systèmes modèles du laboratoire, comme celui de la production de produits manufacturés.

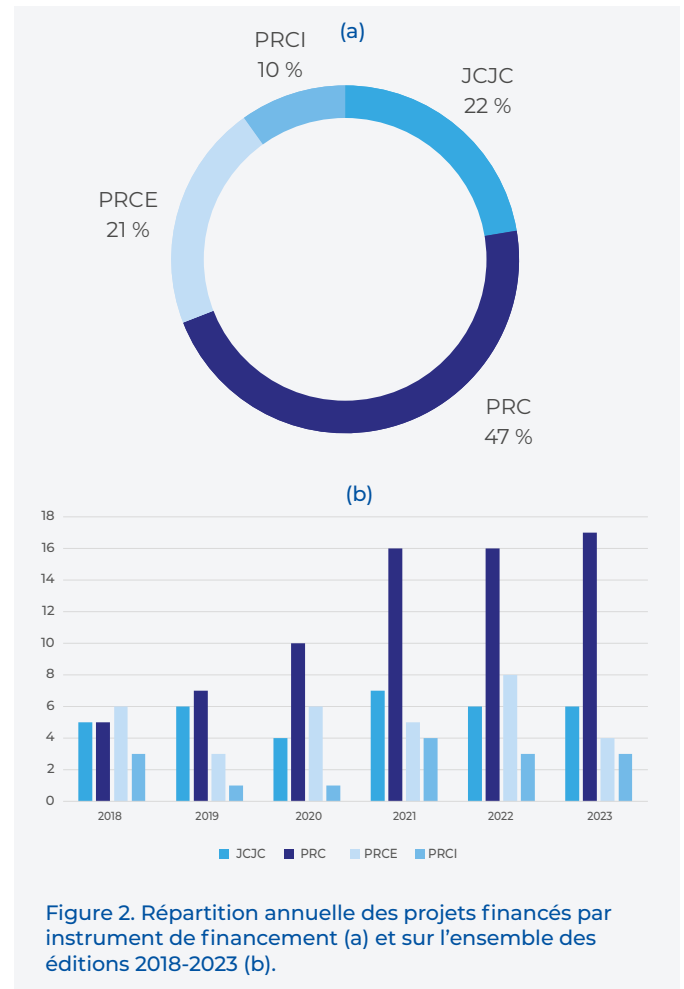


Figure 2. Répartition annuelle des projets financés par instrument de financement (a) et sur l'ensemble des éditions 2018-2023 (b).

Les projets collaboratifs internationaux (PRCI) correspondent à des collaborations bilatérales sélectionnées dans le cadre de l'AAPG. L'objectif de cet instrument est de promouvoir la collaboration entre des équipes françaises et des équipes d'autres pays.

On observe que les laboratoires français financés par l'instrument PRCI sont des laboratoires habitués à déposer des projets auprès du CE42, tels que les laboratoires MATEIS (Matériaux : Ingénierie et Science), IEMN (Institut d'électronique de microélectronique et de nanotechnologie) et l'Institut Fresnel. Les évaluations sont alternativement réalisées par l'ANR et l'agence de financement étrangère. Parmi les 15 projets financés, cinq ont été évalués uniquement par une autre agence que l'ANR, selon une procédure de Lead Agency⁶. Dans le cas présent, ce sont des projets exclusivement en partenariat avec des équipes allemandes financées par la DFG.

6. L'agence dite *lead* prend en charge la réception, l'évaluation et la sélection des projets pour le compte des deux pays. Les principaux partenaires étrangers concernés par cette procédure en *Lead Agency* sont la DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) pour l'Allemagne, le FNS (Fonds national de suisse) pour la Suisse, le RGC (Research Grants Council) pour Hong Kong, le FNR (Fonds National de la Recherche) pour Luxembourg, et la NRF (The National Research Foundation) pour Singapour.

Enfin, comme pour les autres comités de l'ANR, la majeure partie des projets financés sont des projets collaboratifs (PRC) qui vont couvrir l'ensemble du périmètre thématique du CE42.

Panorama des partenaires financés dans les projets sélectionnés

L'ensemble des projets financés entrant dans le périmètre d'étude de ce cahier ont mobilisé 179 équipes de recherche bénéficiaires. La figure 3 révèle que la moitié des partenaires financés sont des organismes de recherche. Le CNRS est l'organisme de recherche le plus présent dans les projets (tableau 1). Il est suivi du CEA, dont la présence est plus marquée dans les projets financés par ce comité, l'instrumentation étant une thématique phare pour le CEA. De manière plus marginale, le BRGM, l'Institut Curie et l'INRAE participent chacun à deux projets.

CNRS	82
CEA	22
Institut d'Optique	4
European Synchrotron Radiation Facility	4
STMICROELECTRONICS	3
Abbelight	2
Aryballe	2
BRGM	2
Institut Curie	2
INRAE	2
Junia	2
SEDI-ATI Fibres Optiques	2
Thales	2

Tableau 1. Occurrence d'apparition des partenaires impliqués dans au moins deux projets financés.

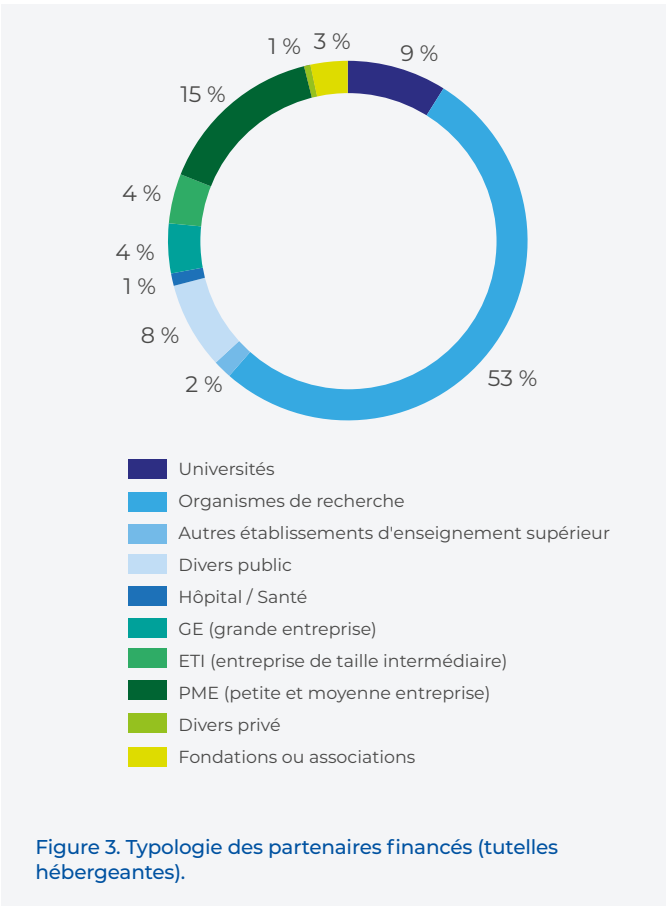


Figure 3. Typologie des partenaires financés (tutelles hébergeantes).

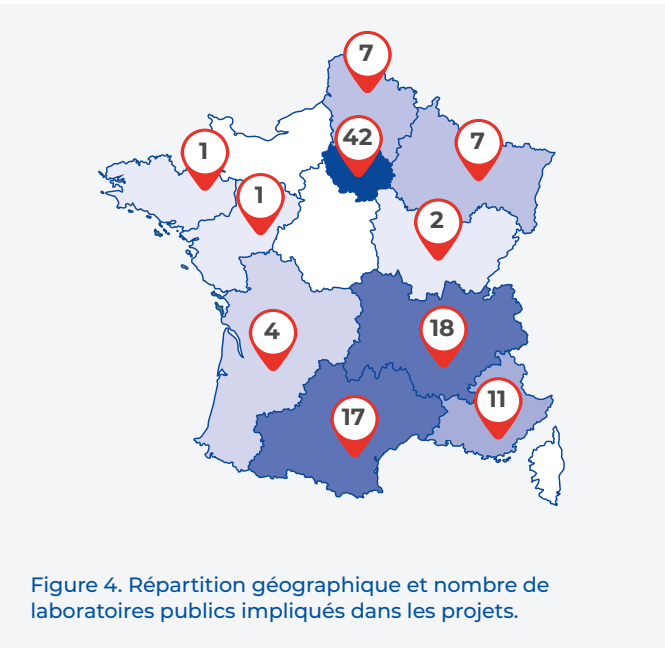


Figure 4. Répartition géographique et nombre de laboratoires publics impliqués dans les projets.

On observe une répartition relativement homogène des 110 laboratoires de recherche sur l'ensemble du territoire (figure 4). Une thématique dominante des projets, la métrologie, fait ressortir des structures de recherche identifiées en sciences de l'ingénieur, en physique ou en électrochimie. Parmi elles, une quinzaine de grands laboratoires se distinguent : l'Institut Fresnel, l'Institut Néel, l'IEMN, FEMTO-ST, l'IPCMS ou MATTEIS, etc. Cette carte illustre la répartition des compétences liées à une instrumentation de laboratoire :

- Optique, photonique, électromagnétisme pour l'Institut Fresnel ;
- nanosciences et nanotechnologies associées à des centrales de technologie RENATECH++ (NEEL, IEMN, FEMTO-ST) ;
- Physique et chimie des matériaux pour l'IPCMS et MATTEIS.

Cependant, ces projets étant collaboratifs et interdisciplinaires, le champ des laboratoires concernés est bien plus large : médecine, biologie animale ou végétale, chimie et biochimie, sciences de l'environnement. La communauté scientifique associée repose sur un maillage dynamique soutenu quand cela est possible, par quelques Groupements de recherche (GDR) et réseaux nationaux dont les thématiques sont facilement identifiables, tels que le GDR d'imagerie du vivant, Imabio, le réseau METSA pour la microscopie électronique et la sonde atomique et, de façon plus prospective, des sections du GDR ONDES ou Nanoteramir pour le THz, etc.

Les PME représentent 15 % des partenaires impliqués, ce qui est assez remarquable comparativement à d'autres comités où les universités sont généralement aussi présentes que les organismes de recherche. Parmi ces PME, notons la présence d'Abbelight, créée en 2016, qui développe et commercialise des microscopes optiques, capables d'obtenir des images d'une résolution de l'ordre de 10 nanomètres et permettant d'observer la structure moléculaire des organismes cellulaires. Aryballe, fondée en 2014, a pour ambition de reproduire l'odorat humain de manière fiable et collabore avec des entreprises du secteur de l'automobile, de l'électroménager et des arômes comme outil d'aide à la décision. Enfin, SEDI-ATI Fibres Optiques, est un fabricant de composants à base de fibres.

Globalement, près d'un quart des partenaires industriels dans les consortiums sont des entreprises (PME, ETI et grandes entreprises). Parmi les grandes entreprises, Thales intervient dans deux projets et STMicroelectronics dans trois projets.

Pour conclure, l'analyse des projets financés fait apparaître trois caractéristiques :

- des communautés très diverses s'intéressant à la fois à des problèmes industriels et à des questions fondamentales ;
- un axe de recherche caractérisé par une large couverture thématique : on trouve ainsi des projets traitant aussi bien d'imagerie en biophysique que de magnétisme ultrarapide ou de caractérisation des électrodes d'une batterie lithium-ion en fonctionnement ;
- des approches multimodales liant caractérisations physique et chimique dans des conditions in situ et in operando.

Une description plus détaillée du panorama scientifique sera présentée dans la partie relative aux disciplines.

Répartition femme-homme

Les femmes occupent 31 % des postes à responsabilités dans les partenariats des projets, une proportion stable au fil des années (figure 5a). Ce chiffre reflète certainement une sous-représentation

des femmes au sein de cette communauté. En revanche, leur présence à des postes de coordination est un peu plus forte, atteignant 39 %.

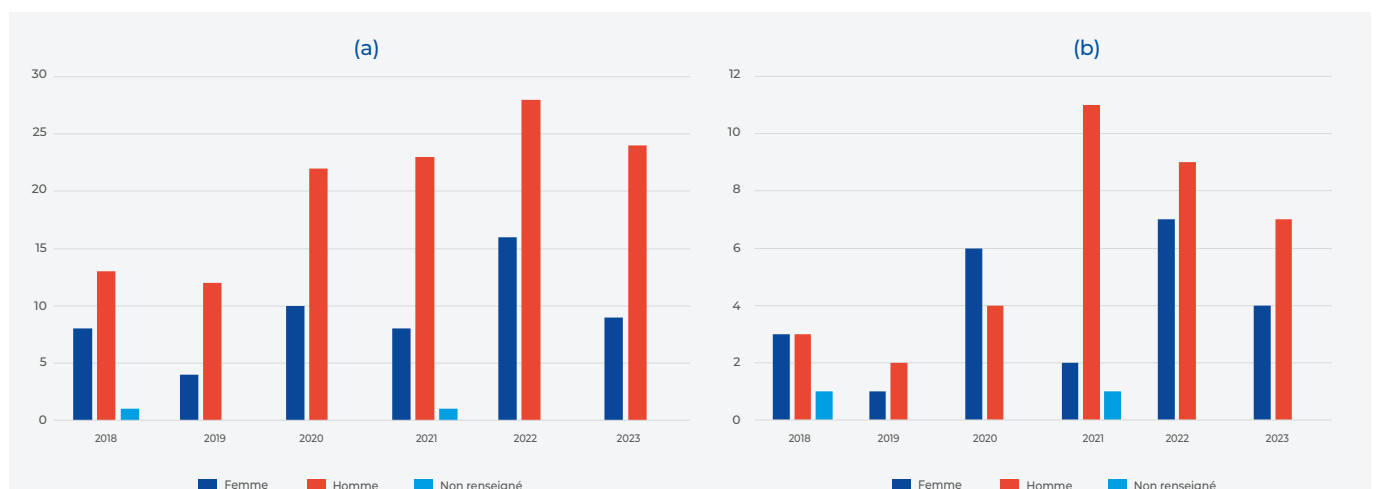


Figure 5. Répartition par année des responsables scientifiques selon le genre (a) et évolution annuelle des coordinateurs et coordinatrices (b).

Disciplines mobilisées

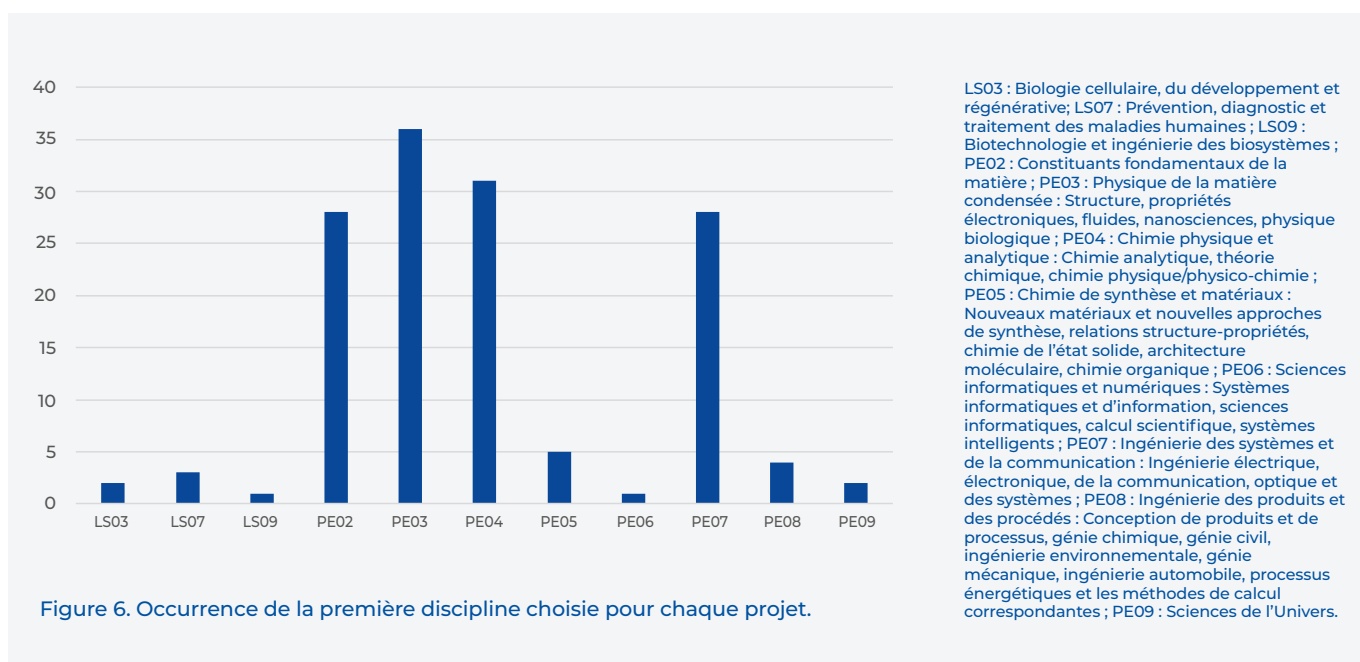
Lors du dépôt, chaque porteur ou porteuse de projet a la possibilité d'associer jusqu'à trois disciplines scientifiques, basées sur le découpage ERC⁷, pour caractériser leur projet. Les disciplines ERC sont regroupées selon trois grandes catégories : sciences de la vie (LS⁸), sciences sociales et humanités (SH⁹) et sciences physiques et ingénierie (PE¹⁰). Chaque catégorie est subdivisée en domaines scientifiques.

En se basant uniquement sur la première discipline proposée pour chaque projet, on peut dégager une « tonalité » scientifique s'articulant autour de quatre domaines (figure 6) :

- PE02 « phénoménologie des interactions fondamentales », en raison de l'optique, thème transversal par excellence ;
- PE03 « physique de la matière condensée », pour la matière condensée ;
- PE04 « chimie physique et analytique », pour les méthodes de caractérisation, l'électrochimie, les méthodes de détection en chimie et les spectroscopies ;

• PE07 « ingénierie des systèmes et de la communication » pour les micronanosystèmes en règle générale. Le reste correspond à des signaux apparemment faibles, néanmoins informatifs. Le domaine PE09 par exemple, est associé aux Sciences de l'Univers et son score témoigne ici de la faible représentation des projets sur les détecteurs de particules. On constate aussi la présence des sciences du vivant et de la santé, qui vont de la biologie cellulaire (LS03) et des biotechnologies (LS09) aux technologies pour le diagnostic (LS07). Les projets à l'interface avec les sciences du vivant tiennent donc une place importante, touchant des domaines différents comme les nez artificiels, la détection de molécules, l'imagerie en biologie moléculaire et cellulaire, etc.

Cette classification donne un aperçu des domaines scientifiques abordés dans les projets, mais ne permet pas d'avoir une vision claire quant à l'objet et au principe de la chaîne de mesure. Une lecture approfondie de l'ensemble des projets permet de mieux préciser les recherches menées et une classification des sujets sera proposée par la suite.



7. European Research Council

8. LS : Life Sciences

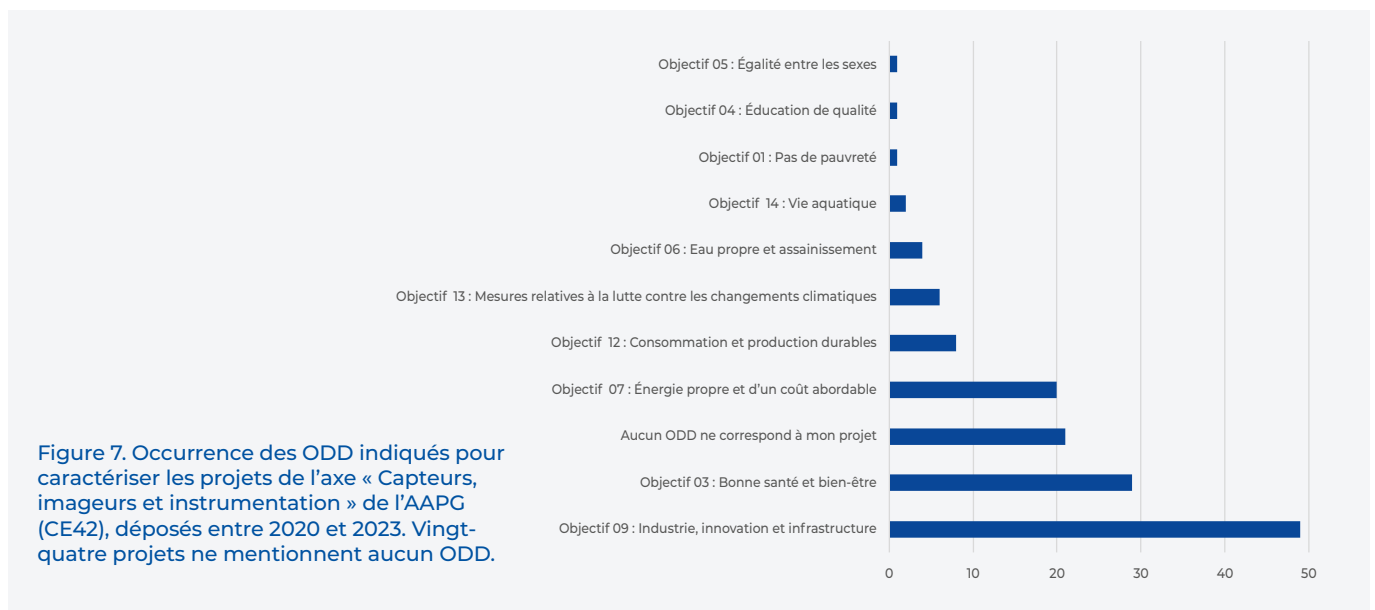
9. SH : Social Sciences and Humanities

10. PE : Mathematics, physical sciences, information and communication, engineering, universe and earth sciences

Objectifs de développement durable

Depuis l'édition 2020, les porteurs et porteuses de projets ont la possibilité de renseigner jusqu'à trois Objectifs de développement durable (ODD) en lien avec leur projet. Ainsi, sur les éditions 2020-2023, 92 coordinateurs et coordinatrices ont mis leur projet en relation avec au moins un ODD. Comme le révèle la figure 7, près de la moitié des projets mettent en avant l'ODD 9 « Industrie, innovation et infrastructure » ce qui illustre leur forte orientation vers un

domaine applicatif, même en l'absence d'entreprise au sein du consortium. De plus, 20 projets indiquent être en lien avec l'ODD 7 « Énergie propre et d'un coût abordable » où l'instrumentation est aussi très présente. Enfin, 29 projets sont associés à l'ODD 3 « Bonne santé et bien-être », laissant penser que près d'un tiers de ces projets serait en lien avec la santé, ce qui est toutefois largement surestimé lorsqu'on analyse les sujets d'étude.

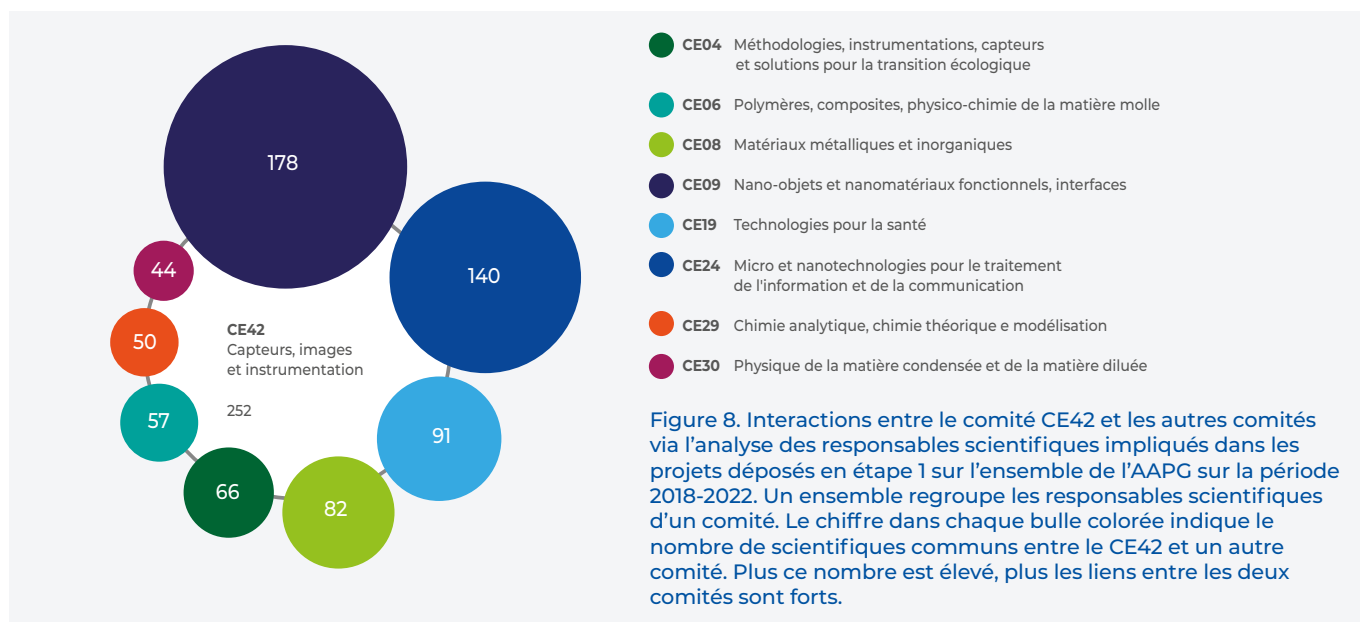


Interfaces avec les autres comités de l'Appel à projets générique

Cartographier l'intersection des ensembles, comme l'illustre la figure 8, constitue une méthode pour mesurer les interactions entre le CE42 et son environnement, en s'appuyant sur la liste des responsables scientifiques. Lors de son évaluation, un projet est organisé en lots consacrés à différentes tâches (*work packages*). Dans les programmes collaboratifs en particulier, chaque lot a un responsable. La liste des responsables scientifiques, incluant le coordinateur ou la coordinatrice, présente dans le document de soumission permet de donner une image du contexte scientifique du projet.

L'intersection de ces deux ensembles pour deux comités est alors une mesure des interfaces et des flux entre comités. C'est ce qui a été fait ici, pour la période 2018-2022, tant sur les projets déposés en phase 1 de l'évaluation que sur les projets financés. Nous dérogeons ici temporairement à notre règle d'analyse qui ne porte que sur les projets financés, car les petites communautés sont naturellement sujettes à de très fortes fluctuations. Prendre les projets déposés en phase 1 permet de les lisser.

Il est logique de retrouver l'interface historique avec le comité CE09 (Nanomatériaux) et le CE24 (Technologies de l'information et de la



communication), tous deux issus du même défi, ainsi qu'avec le CE30 (Physique). On constate aussi, dans une moindre mesure, des interfaces avec le CE29 (Chimie analytique, chimie théorique et modélisation), notamment pour les techniques de détection photo-électrochimique, le CE06 (Polymères, composites, physico-chimie de la matière molle) ou le CE08 (Matériaux métalliques et inorganiques) ainsi qu'avec le CE19 dédié aux technologies pour la santé, voire avec le CE04 (Méthodologies, instrumentations, capteurs et solutions pour la transition écologique).

Les statistiques nous amènent naturellement à explorer les domaines scientifiques portés par les interlocuteurs du CE42. Ces domaines, qui seront détaillés par la suite, présentent des intérêts recouvrant plusieurs comités. À titre d'exemple, citons :

- Techniques multimodales utilisant le TEM pour sonder les propriétés mécaniques, tribologiques, etc., de nanomatériaux in situ (CE08, CE09).

- Techniques et dispositifs micro-nano de détection de protéines ou de suivi biochimique (CE19, CE09).

- Imageries spectroscopiques rapides de textures magnétiques ou ferro-électriques pour les nouveaux dispositifs en nano-électronique (CE24, CE30).

- Techniques couplant électroluminescence et stimulation électrochimique (CE29).

- Détection de traces d'éléments dans l'environnement ou l'atmosphère (CE04).

Répartition thématique des projets

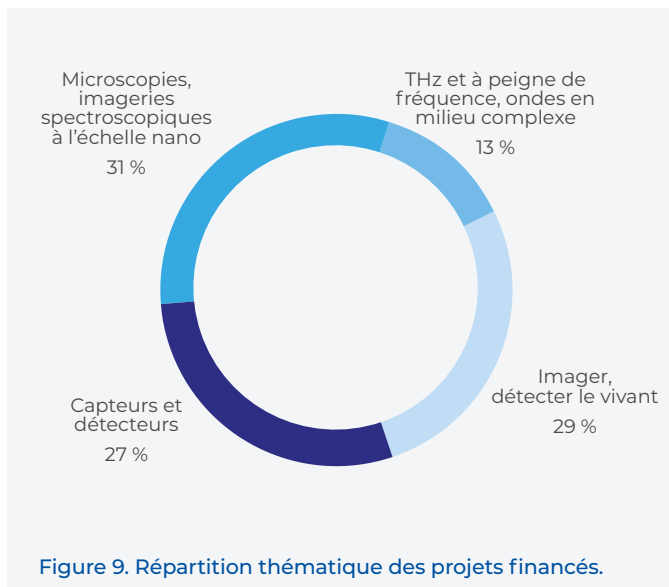
L'optique, la nano-optique ou la photonique sont au cœur de l'imagerie que ce soit en champ proche ou en champ lointain. Leurs domaines d'applications vont des systèmes vivants à la matière condensée, car les microscopies de champ proche donnent une cartographie des propriétés opto-électroniques à l'échelle nanométrique aussi bien sur des objets individuels (atomes, fils quantiques...) que sur des objets étendus, comme les matériaux 2D. L'optique étant transversale, il se dégage alors quatre grands domaines dont le poids relatif est donné dans la figure 9 :

- Imager, détecter le vivant.

- Microscopies, imageries spectroscopiques à l'échelle nano.
- THz et à peigne de fréquence, ondes en milieux complexe.
- Capteurs et détecteurs.

Imager, détecter le vivant

Le vivant est donc le domaine scientifique le plus représenté. Il intègre également les projets portant sur les microsystèmes ainsi



que ceux visant à une détection de protéines ou d'espèces moléculaires. Les techniques d'imagerie médicale sont absentes du périmètre et l'imagerie neuronale est quasiment inexistante. Cette première catégorie regroupe environ 29 % des projets et, sans être exclusive, se situe en amont des comités biologie cellulaire ou du développement¹¹ ainsi que de ceux spécialisés en technologie pour la santé¹².

Imagerie et microscopie en biologie

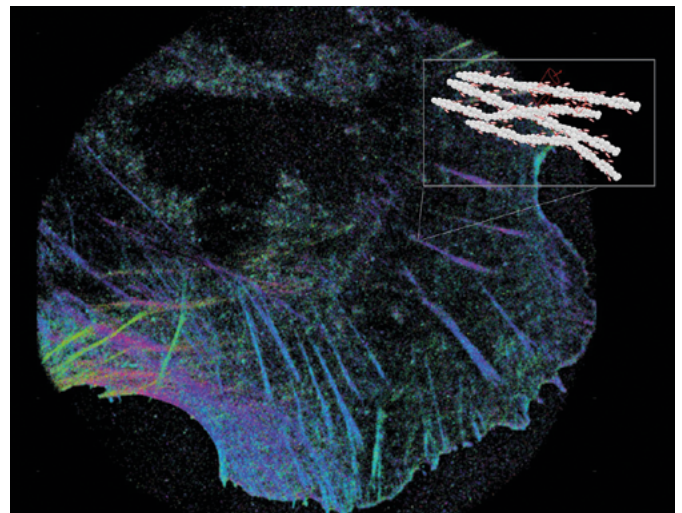
Cet axe est dédié aux développements de stratégies novatrices en imagerie optique pour la biologie au niveau cellulaire, multicellulaire (tissus) ou sur des organoïdes (marqueurs, méthodologies, conception d'instruments). La quête de résolution spatiale étant prioritaire, la microscopie dite « super-résolue » (résolution meilleure que la limite de diffraction, techniques PALM, STED, STORM, illumination structurée...) est devenue un élément essentiel de la boîte à outils de la bio-imagerie, permettant d'atteindre une résolution de l'ordre de 10 nm, révélant ainsi des informations structurales sur les cellules étudiées. Les grands domaines de développements actuels concernent plutôt les méthodes d'acquisition pour sonder non seulement la localisation, mais aussi l'orientation des protéines, améliorer le temps d'acquisition des images, imager en volume ou en profondeur, développer une spectroscopie chimique (souvent dans le régime vibrationnel Raman), sonder l'environnement chimique ou physique ou enfin s'affranchir des limitations induites par les marqueurs fluorescents (imageries dites sans marqueur). Le développement de l'instrumentation fait souvent appel à des instruments multimodaux pouvant basculer d'un mode d'imagerie à un autre sur un même échantillon, y compris sur des principes physiques différents (AFM/optique, optique/acoustique, optique de fluorescence/optique Raman, optique/électronique...). On note aussi l'introduction de méthodes impliquant des reconstructions numériques intensives (résolution de problèmes inverses, microscopie dite « computationnelle ») pouvant faire intervenir des algorithmes d'apprentissage profond, celles-ci étant principalement couplées aux méthodologies faisant appel aux spectroscopies par illumination structurée ou d'holographie 3D. Les spectroscopies de force ou les cryotomographies apparaissent comme minoritaires sur ce comité. De façon générique, les projets consacrent au moins un lot de travail à une démonstration sur des cellules animales ou bactériennes pour démontrer l'intérêt applicatif du projet vis-à-vis de questions de biologie cellulaire ou de biologie du développement.

Les thématiques abordées concernent principalement :

- les techniques optiques d'imagerie en temps réel en biologie ;
- la mesure et la quantification in vivo, à l'échelle microscopique et nanoscopique, des dynamiques et des interactions entre molécules d'intérêts (protéines, acides nucléiques, lipides, ions).

Parmi les projets financés, on peut citer le projet 3D-Polariser coordonné par l'Institut Fresnel, qui développe une technologie d'imagerie de position et d'orientation à l'échelle de la molécule unique dans le but de mieux étudier le comportement orientationnel des protéines des sites d'adhésion cellulaires dont l'organisation est mal connue.

Le projet SpeckleSTED, coordonné par le laboratoire de neurophotonique (CNRS, Université Paris Descartes), a pour but de réaliser de la microscopie super-résolue de type STED¹³ dans des échantillons biologiques en s'appuyant sur les propriétés de la lumière diffusée. Ce type de microscopie, qui est une technique de microscopie de fluorescence à balayage, permet de dépasser la limite de résolution imposée par la diffraction. Ce projet propose de l'étendre à des échantillons biologiques épais en utilisant des patrons d'interférence et des algorithmes de reconstruction d'images.



Imagerie optique super-résolue de l'orientation de marqueurs fluorescents de l'actine dans une cellule.

© S. Brasselet. Projet 3DPolarisR

Micro et nanosystèmes en interface avec le vivant

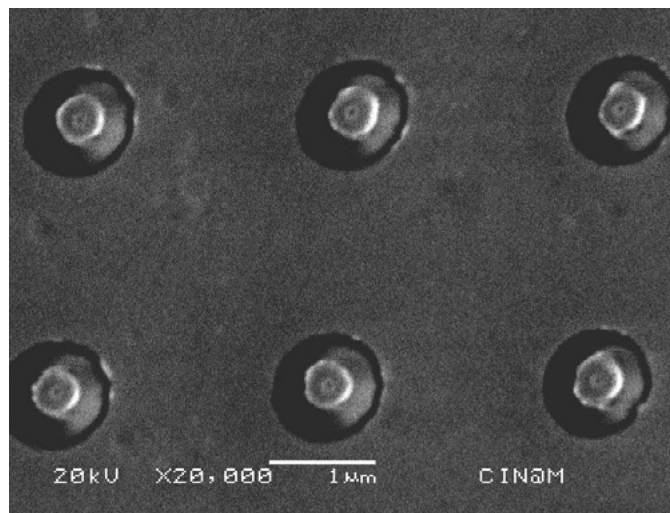
Les systèmes d'interrogation physiologique incluent ici les MEMS¹⁴, les matrices d'électrodes, les dispositifs d'interrogation de molécules individuelles, les substrats, les systèmes basés sur des nanostructures peptidiques ou des systèmes microfluidiques permettant l'analyse d'assemblage ou de systèmes biologiques dans des conditions maîtrisées. Le spectre d'application de ces systèmes est extrêmement large et se situe généralement très en amont des technologies pour la santé. Il couvre, par exemple, l'interfaçage

11. CE13 intitulé « Biologie cellulaire, biologie du développement et de l'évolution ».

12. CE19 intitulé « Technologies pour la santé ».

13. Stimulated Emission Depletion.

14. Microelectromechanical Systems.



Microscopie électronique à balayage de ZMW thermo activable.
© F. Thibaudau, projet SeqSynchro.

neuronal avec des matrices d'électrodes en graphène sur une plateforme multifonctionnelle (projet Nanomesh), les techniques de séquençage de l'ADN à haut débit et à faibles taux d'erreurs (projet SeqSynchro avec de nouvelles générations d'AFM à haute vitesse et leur automatisation), l'imagerie et la culture d'organoïdes sous flux contrôlé de drogues (projet DEEP-HEPATOSCREEN), le tri cellulaire à haut débit en se basant sur une technologie MEMS pour une mesure en continu des paramètres biophysiques (projet Cytomems).

Techniques chimiques et biochimiques pour la détection de molécules dans le vivant, la santé et l'environnement

La détection et l'identification rapide de bactéries pathogènes, d'antigènes ou de métabolites revêtent une importance majeure dans le domaine de l'analyse médicale ou la surveillance de l'environnement. Toutefois, les méthodes existantes sont limitées par des étapes fastidieuses telles que l'amplification de la sonde ou le marquage par fluorescence. Le développement de nouveaux principes de détection pour les biocapteurs très sensibles et sélectifs



Représentation d'un capteur sans fil et ultrasouple placé sur la peau.
© S. Hage-Ali, projet SAWGOOD.

est donc un domaine de recherche très actif tant sur le principe de détection que sur celui d'amplification en bio-électrochimie et biochimie.

Cette thématique regroupe les projets proposant des dispositifs concernant la détection de biomarqueurs ou de pathogènes et l'élaboration de systèmes microphysiologiques. Ces dispositifs sont basés sur des techniques analytiques, électro-analytiques ou bioélectrochimiques ayant une sensibilité très élevée en temps réel : détection et comptage tout électrique d'événements individuels de transfert d'électrons d'oxydoréduction en électrochimie (projet SIBI), technique optique d'interférométrie pour la quantification sur des NP¹⁵ de la production d' H_2O_2 , oxydants très réactifs à très faible durée de vie (projet PIRANA), méthodes de FRET ou de nanopores, utilisation de molécules animales pour l'olfaction digitale (projet OBP-Optinose), voire développement de capteurs sans fil et passifs disposés à la surface de la peau et utilisant les propriétés des ondes acoustiques de surface (projet SAWGOOD).

On note enfin qu'il n'existe que peu de projets sur la problématique environnementale¹⁶, l'un sur la mesure d'aérosols dans l'atmosphère par spectrométrie TeraHertz (projet STEPSON), et l'autre pour la détection électrochimique en ligne d'éléments trace de métaux lourds comme le plomb dans la distribution d'eau potable (projet aQuaLead).

Microscopies et imageries à l'échelle nano

L'interface avec le comité nanomatériaux¹⁷ est présente au niveau de la fonctionnalisation chimique des substrats et la chimie de surface. La caractérisation de la structure de l'état condensé est le berceau des nanosciences. On y retrouve donc la microscopie électronique avec la sonde atomique, mais aussi des développements en microscopie de champ proche liés à des excitations temporelles et optiques. Les propriétés électroniques et des phonons, le magnétisme et la spintronique sont naturellement concernés. Cette deuxième catégorie s'oriente ainsi autant vers le comité de physique¹⁸ que vers des comités davantage spécialisés sur les micro et nanotechnologies appliquées au traitement de l'information et la communication¹⁹. Elle regroupe 31 % des projets, répartis en deux lots.

Nanosciences en champ proche pour la physique du solide

Le premier lot regroupe 28 projets de physique en matière condensée visant à détecter les phénomènes de basses énergies (excitations électroniques, magnétisme, textures magnétiques, ondes de spin, phonons, modifications structurales, etc.) avec une résolution spatiale de l'ordre du nanomètre. Ces propriétés restent, en effet, mal comprises à l'échelle nano et nécessitent une résolution temporelle ultime pouvant aller jusqu'à la femto-seconde pour, par exemple, la démagnétisation, ou la nanoseconde pour les ondes de spin. Cette caractérisation magnétique, thermique ou mécanique est donc obligatoire pour l'utilisation potentielle de ces objets magnétiques dans les supports d'enregistrement ou logiques (nanofils, films minces, nouvelles hétérostructures ou nanoparticules...). Il existe donc un besoin réel, accompagné d'efforts soutenus, dans le domaine de l'imagerie magnétique résolue dans l'espace avec une sensibilité élevée et une échelle de fréquence et de temps.

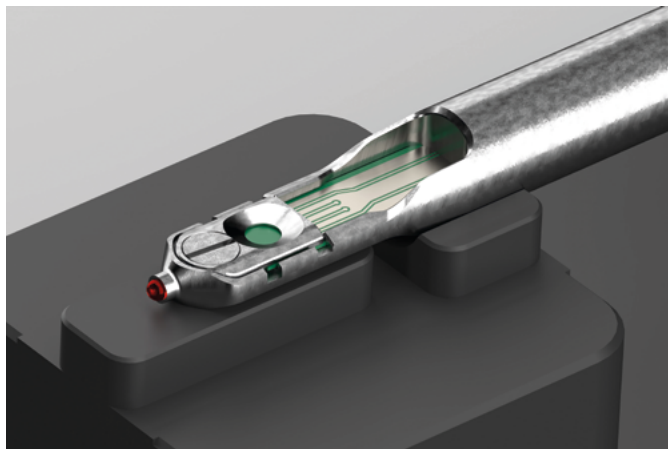
15. Nanoparticule.

16. Car plutôt soutenu dans le comité CE04 « Méthodologies, instrumentations, capteurs et solutions pour la transition écologique ».

17. CE09 « Nano-objects et nanomatériaux fonctionnels, interfaces ».

18. CE30 « Physique de la matière condensée et de la matière diluée ».

19. CE24 « Micro et nanotechnologies pour le traitement de l'information et la communication ».



Vue d'artiste de la tête d'un porte-objet de microscope électronique incluant des lignes de transmission radiofréquences jusqu'à la tête du porte-objet.

© N. Biziere, projet EHIS.

En règle générale, ces méthodes font appel à des spectroscopies ultra-résolues en fréquence, des techniques de diffraction ou des techniques de microscopie électronique suivant un schéma de type pompe-sonde avec une excitation localisée et une lecture retardée. Les stratégies expérimentales dépendent évidemment des phénomènes étudiés tant pour la lecture que pour l'excitation avec les deux systèmes intégrés au sein d'un même instrument : microscopie électronique ultrarapide (UTEM), microscopies à sonde locale allant dans le domaine du THz, holographies électroniques, RMN locale, etc.

Les thématiques abordées concernent :

- Les propriétés électroniques, vibrationnelles et thermiques des nanostructures ou des films minces. Par exemple, le projet HANIBAL vise à caractériser le transfert thermique lié aux phonons balistiques avec des capteurs de très grande sensibilité. Par ailleurs, cartographier les propriétés électriques et thermiques de nanofils de semiconducteur est évidemment d'intérêt général, car ces dispositifs interviennent de façon générique dans les capteurs et les technologies quantiques. Ainsi, le projet IMAGIQUE se propose d'utiliser la réponse d'un nanofil à faisceau d'électrons pour le faire.
- La dynamique du magnétisme local, comme avec le projet EHIS, coordonné par le CNRS, qui utilise l'holographie électronique pour mettre en place un nouvel outil expérimental d'imagerie magnétique à une échelle nanométrique avec des applications potentielles en magnonique et spintronique. Le projet MEDYNA, coordonné par le Synchrotron Soleil, vise à comprendre la dynamique de l'aimantation à l'échelle du temps électronique en utilisant des rayons X couplés à un laser ultrarapide sur une résolution spatiale nanométrique dans des structures magnétiques (parois de domaine, skyrmions).

Microscopies électroniques et caractérisation des nanomatériaux

Ce deuxième lot regroupe 19 projets visant à des développements technologiques en vue d'une meilleure compréhension de la dynamique et la structure des matériaux. Il s'agit d'analyser et de caractériser en temps réel les évolutions morphologiques, cristallographiques, ou chimiques (par le suivi réactionnel) des nanomatériaux lors de sollicitations in situ qui reproduisent au mieux leurs conditions réelles d'utilisation. L'objectif est d'améliorer la sensibilité de détection des signaux ainsi que leur résolution

spatiale et temporelle, tout en se rapprochant davantage des conditions réelles d'utilisation des nanomatériaux (gaz, liquide). Les analyses in situ et operando font appel à toutes les techniques permettant d'étudier la matière de l'échelle nanométrique jusqu'à l'échelle atomique. Ces développements concernent la microscopie électronique (TEM environnemental, STEM, etc.), la sonde atomique, les microscopies à sonde locale et les méthodes associées au rayonnement synchrotron ou aux spectroscopies (Raman, Brillouin).

L'originalité des propositions repose généralement sur la combinaison de plusieurs techniques expérimentales permettant de corréler des mesures sur le même échantillon et dans les mêmes conditions. L'accent est mis sur les équipements de laboratoires plus polyvalents et moins coûteux que les équipements liés aux grandes installations. Cet axe est surtout porté par la chimie du solide et regroupe une part significative des PRCE (sept projets²⁰).

Les thématiques abordées concernent :

- Des développements expérimentaux en microscopie électronique en milieux liquides ou gazeux, sonde atomique, et microscopie électronique à transmission. Par exemple, le projet MULTIPROBE vise à caractériser localement et dans des conditions réelles des catalyseurs bimétalliques en combinant microscopies électroniques et rayons X. D'un autre côté, le projet HI-KEAP cherche à améliorer à la fois la tomographie par sonde atomique en optimisant la résolution en masse et le pouvoir discriminant en énergie de la sonde atomique.
- Des études sur l'évolution dynamique des constituants avec des sondes capables d'effectuer des mesures structurales in situ et in operando sur des temps courts ou des démarches s'inspirant de la microscopie électronique environnementale, ce qui permet d'éviter les contraintes sous vide. Comme exemples, citons le projet DESTINAion_Operando qui permet de visualiser des réactions électrochimiques en temps réel sur des batteries (Li-ion Na-ion) en associant microscopies électroniques à transmission et rayons X, ainsi que le projet NACELL dédié aux réactions de surface sous pression.

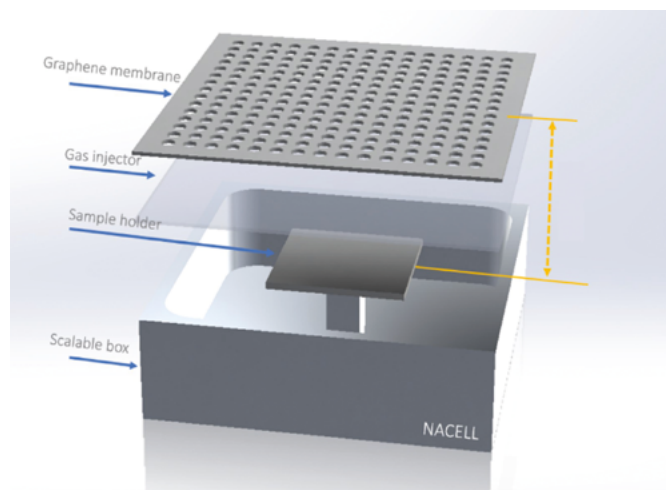


Schéma d'une cellule isolée du vide par une membrane -type capsule- capable de contenir un gaz en son intérieur : sa conception comprend un système d'injection, une membrane transparente isolante et un porte-échantillon.

© S. Xing, projet NACELL.

20. ALXM, I2T2M, Dip-NMR, FLEX-UV, FIBback, Hi-KEAP, NACELL

THz, peigne de fréquence, ondes en milieux complexes

La troisième catégorie est plus prospective, car associée à un thème émergent. Le développement de sources lumineuses ultrarapides permet le contrôle dynamique à haute fréquence. Initialement cantonné au domaine des télécommunications, le domaine du THz est lié à de nouvelles spectroscopies, associées ou non à des peignes de fréquence, dans une gamme spectrale située entre l'électronique et le MIR. Par souci de simplicité, cette catégorie comprend aussi quelques projets sur la manipulation des fronts d'onde optique ou sur l'imagerie par tavelures. Son empiètement est d'environ 13 %.

Le domaine des ondes THz se situe entre les micro-ondes et l'infrarouge. Ces ondes électromagnétiques ont été relativement peu étudiées en raison du manque de sources puissantes et de systèmes de détection suffisamment sensibles. Leur intérêt réside dans leurs propriétés spécifiques : faible absorption par certaines molécules et matériaux et, surtout, caractère non destructeur. Ce domaine est en pleine expansion depuis la démocratisation des lasers femto-secondes qui sont à la base de nombreuses sources THz. Ces lasers sont aussi à l'origine des méthodes à peigne de fréquence couvrant une gamme de fréquences allant du THz à l'ultraviolet, utilisées pour détecter des effets rotationnels ou vibrationnels. Enfin, des techniques optiques et acoustiques de manipulation de front d'onde et d'imagerie en milieu complexe sont employées pour caractériser des nanomatériaux ou la matière vivante.

En résumé, les thématiques abordées sont :

- les instrumentations de laboratoire ou industrielles pour les technologies THz (sources, fibres, etc.) ;
- la détection de molécules ou d'aérosols à distance dans le THz ;
- le développement de spectroscopies à peigne de fréquence ;
- les techniques de contrôle, d'imagerie et de caractérisation des ondes optiques et acoustiques dans les milieux complexes.

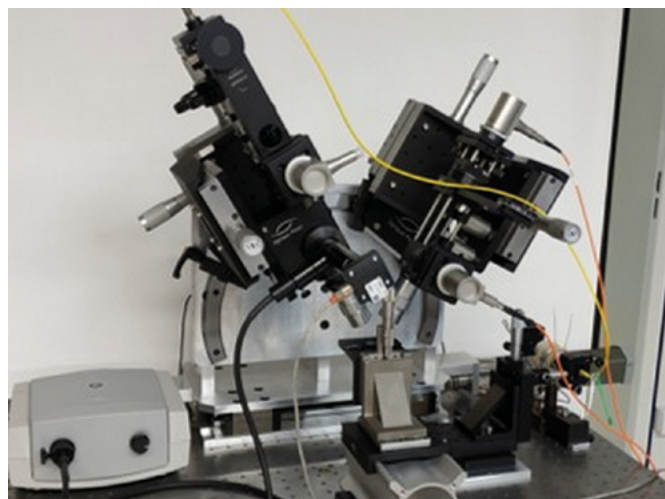
À titre d'exemple, le projet STEPSON de l'IEMN, propose de renforcer la connaissance des propriétés physicochimiques de l'atmosphère en étudiant les indices complexes de réfraction (ICR) des aérosols dans une large gamme THz. Ces données sur des particules en suspension sont importantes pour les études portant sur le bilan radiatif planétaire.

Le projet Hypster, quant à lui, se concentre sur la généralisation de l'imagerie THz dans des milieux complexes et diffusants, afin de reconstruire des objets 3D faiblement absorbants dans cette gamme de fréquences, avec des applications potentielles en contrôle nondestructif. D'un autre côté, les détecteurs optiques actuels sont sensibles à l'intensité, ce qui rend nécessaire l'encodage de la phase pour obtenir une imagerie de phase sur des tavelures en milieux diffusants avec une nouvelle analyse du front d'onde. C'est précisément l'objectif du projet Maxphase qui vise à développer un nouveau principe de détecteur de front d'onde. Le rayonnement THz nécessite encore des avancées tant conceptuelles que techniques et ce projet, avec une mise en application possible et rapide, illustre parfaitement la manière dont ces deux approches sont conjuguées au niveau du comité.

Enfin, le projet WASPE, coordonné par l'IEMN, propose une cellule plasma d'un nouveau type adapté à l'analyse de la composition chimique du plasma en utilisant la spectroscopie THz afin d'améliorer les traitements plasma associés aux rejets de composés organiques volatils (COV) dans l'atmosphère.

Capteurs et détecteurs

Cette dernière section regroupe l'ensemble des projets de type capteur, reposant sur des technologies ayant atteint un haut niveau de maturité technologique ou visant un transfert technologique rapide pour des technologies émergentes dans l'industrie. L'approche intègre généralement plusieurs éléments physiques, notamment l'interaction lumière-matière ou la génération d'ondes acoustiques de surface pour la température ou les déformations. Outre la capacité à mesurer, à détecter et à cartographier des propriétés physiques ou chimiques, comme la corrosion, in situ et in operando, les projets visent à apporter des solutions capables de fonctionner dans des environnements sévères, par exemple à températures élevées ou dans l'espace, dans des environnements mécaniquement contraints en mouvement, ou de les implanter directement dans la chaîne de fabrication. Comme pour l'ensemble du comité, à l'exception des biocapteurs, les capteurs basés sur des couches sensibles chimiquement traitées sont rares en raison de leur manque de polyvalence. Cette catégorie comprend un nombre important de PRCE²¹ (11 projets), tout en restant bien souvent au niveau d'une instrumentation de laboratoire. Les domaines couverts par ces projets sont les suivants :



Microscope à incidence oblique conçu pour le banc de spectroscopie Brillouin.

© L. Martinie, projet INSPECTION.

• Imageries et mesures en mécanique, en tribologie, en mécanique des fluides et en mécanique de la fracture

Par exemple, le projet MIGNON propose une solution de mesure MEMS discriminante de paramètres physiques pour des gaz et ce, sans ajouter une couche de fonctionnalisation chimique. Le projet INSPECTION, quant à lui, est un projet de tribologie de contact qui a pour finalité de caractériser un lubrifiant dans un contact confiné, avec des applications industrielles évidentes pour la caractérisation en ligne. On retrouve également le projet OmicroN qui se concentre sur la mesure micro-onde des contraintes résiduelles dans des petites pièces métalliques, ainsi que le projet e-Warnings dédié au suivi précoce des défaillances des pièces mécaniques grâce à des signaux acoustiques.

21. EASCVsens, DEVINS, NANOPTIX, OmicroN, e-WARNINGS, WISSTITWIN, COQTEL, EL-TORO, 'ENCORE', CIFOM et SEXHY.

· Détection chimique, mesure et identification des phénomènes chimiques

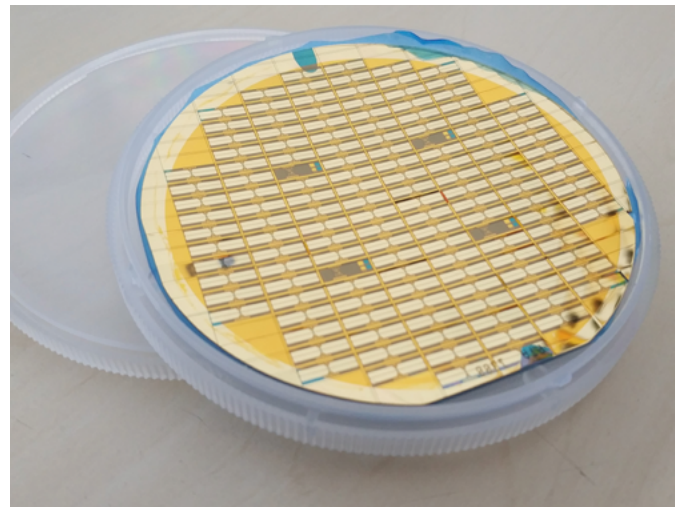
Le projet COQTEL, par exemple, a pour objectif de développer une méthode pour inspecter la corrosion sur des structures métalliques avec un système à faible coût. Dans le même esprit, le projet EL-TORO vise, quant à lui, l'analyse des armatures en béton armé en utilisant la tomographie électrique ;



À gauche, équipement développé pour l'interrogation active et passif de pièces aéronautiques métalliques par ondes ultrasonores. À droite, un coupon de test équipé d'éléments actifs piézoélectriques.
© V. Lozada, projet COQTEL.

· Nanosources de lumière et détecteurs sur l'ensemble du spectre électromagnétique, magnétomètres, etc.

Le projet MAROT a pour objectif de remplacer les magnétomètres utilisés dans certains satellites par un instrument ultra-sensible et miniature basé sur des jonctions tunnels en utilisant des techniques de microfabrication issues de la microélectronique. DEVINS, quant à lui, s'intéresse aussi au domaine spatial, en proposant de nouveaux détecteurs dans l'UV lointain destinés à l'observation spatiale dans les satellites, avec une durée de vie bien supérieure à celle que l'on connaît actuellement. D'un autre côté, DIAMMONI est un nouveau détecteur pour les accélérateurs d'ions en physique nucléaire ou en radiothérapie.



Wafer 100 mm avec 140 puces du capteur MAROT.
© P. Sabon projet MAROT.

Conclusion

Le développement de méthodes et de caractérisation est parfois moins mis en avant au sein de la communauté scientifique qui tend à privilégier des approches perçues comme plus accessibles au grand public. Ce dernier en prend généralement connaissance par le biais de grands instruments ou de programmes d'envergure comme ceux de l'aérospatial ou de l'astronomie. Nous avons démontré ici que les avancées liées à la mesure et à la caractérisation interviennent à tous les niveaux.

La valeur ajoutée de l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation » porté par le comité 42 réside aussi dans sa capacité à adopter une approche différente de celle des comités disciplinaires. Les projets s'appuient exclusivement sur une instrumentation de laboratoire, et le « développement de méthodes et de caractérisation »

apparaît généralement comme le premier « mot-clé » mis en avant par les porteurs de projets. D'autres mots-clés émergent : métrologie, contrôle non destructif, techniques de traitement de données, caractérisation in situ/in operando, imageurs, capteurs, microscopies, suivi de la réactivité chimique et biologique, etc. Loin d'une logique de compartimentation disciplinaire, ces quelques critères généraux permettent de rassembler une communauté d'experts venant d'horizons divers autour d'une question très simple : comment sortir le signal du bruit ?

Cette partie met en lumière l'idée qu'il n'existe pas de solution universelle. Les projets présentés en annexe proposent des pistes pour approfondir la réflexion.

Partie 2

LE FINANCEMENT DES PROJETS « CAPTEURS » AU SEIN DE FRANCE 2030

Inscrit dans la continuité des Programmes d'investissements d'avenir (PIA), France 2030, lancé par le Président de la République en 2021, est un plan d'investissement en soutien à la recherche, à l'enseignement supérieur et à l'innovation. Il vise à transformer durablement des secteurs clefs de l'économie (énergie décarbonée, automobile, santé, aéronautique ou encore espace), de la recherche fondamentale jusqu'à l'industrialisation d'un produit ou service nouveaux. L'ANR a été confirmée par l'État en tant

qu'opérateur des actions du plan dans le champ de l'enseignement supérieur de la recherche.

Doté de 54 milliards d'euros, dont neuf sont gérés par l'ANR, France 2030 s'appuie sur 10 objectifs permettant de « mieux produire », « mieux vivre » et « mieux comprendre le monde » et se concentre pour cela, sur des secteurs et stratégies prioritaires définis par l'État.

Depuis 2010, trois dispositifs ont permis le financement de projets où l'instrumentation joue un rôle important :

- Les actions **Équipements d'Excellence** (EquipEx) lancées en 2010 et 2011, puis Équipements Structurants pour la Recherche (ESR/EquipEx+), lancés en 2018 et 2021, dont les objectifs étaient de doter la recherche française d'équipements de haut niveau.
- Les **Laboratoires d'Excellence** (LabEx) lancés en 2010, qui visaient à doter les laboratoires ayant une visibilité internationale de moyens significatifs pour leur permettre de faire jeu égal avec leurs homologues étrangers, d'attirer des chercheurs et des enseignants-chercheurs de renommée internationale et de construire une politique intégrée de recherche, de formation et de valorisation de haut niveau.
- Les **Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche** (PEPR) lancés à partir de 2021, visaient à construire ou consolider un leadership français dans des domaines scientifiques liés ou susceptibles d'être liés à une transformation technologique, économique, sociétale, sanitaire ou environnementale et qui sont considérés comme prioritaires au niveau national ou européen.

Outre ces actions, d'autres projets intègrent des activités de recherches associées à de l'instrumentation ou des capteurs innovants, notamment ceux englobant de nombreux laboratoires tels que les EURE (Écoles Universitaires de Recherche) et des Instituts Convergence comme CENTURI.

Un certain nombre de ces projets financés dans le cadre de France 2030 visent essentiellement à l'intégration de capteurs déjà existants dans des structures instrumentales complexes. Cette intégration peut toutefois conduire à des améliorations des capteurs, tant en ce qui concerne leur technologie, leur interconnexion en réseau, le mode de lecture associé que l'analyse du signal capté. Ainsi, le tableau 2 offre une vue non exhaustive d'un certain nombre de LabEx, EquipEx ou encore ESR/EquipEx+, ayant pu donner lieu à des innovations significatives dans les capteurs²². De par leur spécificité, ces dispositifs ont pu héberger des projets contribuant à des développements innovants dans le domaine de l'instrumentation ou des capteurs via par exemple le financement de thèses. Enfin, certains projets financés dans le cadre des PEPR peuvent être complètement dédiés à l'optimisation de capteurs.

Acronyme	Édition	Titre	Action	Aide allouée (M€)
Les Équipements d'Excellence et Équipements Structurants pour la Recherche (EquipEx et ESR/EquipEx+)				
2D-MAG	2021	Two-dimensional magnetic materials	ESRE	2,3
ATTOLAB	2011	Plateforme pour la dynamique attoseconde	EQPX	5
CACSICE	2011	Centre d'analyse de systèmes complexes dans les environnements complexes	EQPX	7,5
CBH-EUR-GS	2017	CBH-EUR-GS	EURE	17,6
CRGF	2011	Lignes synchrotron françaises à l'ESRF	EQPX	2,0
EcoX	2010	Ligne de lumière microfocus et très haute dilution à l'ESRF pour les sciences de l'environnement	EQPX	4,2
e-DIAMANT	2021	Engineering Diamond Sensors for Advancing Science and Industry	ESRE	6,8
EIPHI	2017	Ingénierie et Innovation par les sciences physiques, les savoir-faire technologiques et l'interdisciplinarité	EURE	13,7
Excelsior	2011	Centre expérimental pour l'étude des propriétés des nanodispositifs dans un large spectre du DC au moyen Infra-rouge.	EQPX	3,3
France-Cryo-EM	2021	National instrumentation in cryo electron microscopy	ESRE	16,5
HYBAT	2021	Hybrid antimonide technologies	ESRE	5,5
IDEC	2021	Imagerie et Détection computationnelles	ESRE	2,3
KINOVIS	2011	Capture et analyse avancées des formes en mouvement	EQPX	2,1
MIMETIS	2010	Microscopie Interférométrique et Microscopie Electronique en Transmission In Situ	EQPX	3,5
MORPHOSCOPE 2	2011	Imagerie et reconstruction multiéchelles de la morphogenèse. (Plateforme d'innovation technologique et méthodologique pour l'imagerie in vivo et la reconstruction des dynamiques multiéchelles de la morphogenèse)	EQPX	9,0

Tableau 2. Principaux projets de France 2030 traitant, pour tout ou partie, du développement de capteurs. Le montant de l'aide allouée correspond au montant total du projet.

²². Thème en accord avec les thématiques de l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation » de l'Appel à projets générique.

Acronyme	Édition	Titre	Action	Aide allouée (M€)
Les Équipements d'Excellence et Équipements Structurants pour la Recherche (EquipEx et ESR/EquipEx+)				
NANOFUTUR	2021	Investissements en NANOfabrication pour les nanotechnologies du FUTUR	ESRE	17,5
NANOIMAGESX	2011	Construction et exploitation d'une ligne de nanotomographie au synchrotron SOLEIL	EQPX	7,6
NANO-PHOT	2018	Graduate School in Nano-optics and Nanophotonics	EURE	3,4
NanoX	2017	Science et Ingénierie à l'Echelle Nano	EURE	14,1
Oscillator IMP	2011	Plateforme de Mesure de l'Instabilité des Oscillateurs	EQPX	4,2
PETAL +	2010	Diagnostics Plasma pour l'installation PETAL sur le LMJ	EQPX	9,3
REC-HADRON	2010	RECherche fondamentale en HADRONthérapie	EQPX	1,3
REFIMEVE+	2010	RÉSEAU FIBRE METROLOGIQUE À VOCATION EUROPÉENNE +	EQPX	6,7
SMARTLIGHT	2021	SMARTLIGHT	ESRE	3,0
TEMPOS	2010	Microscopie electronique en transmission sur le plateau Palaiseau Orsay Saclay	EQPX	13,5
TERRA-FORMA	2021	Concevoir et tester l'observatoire intelligent des territoires à l'ère Anthropocène	ESRE	9,6
TIRREX	2021	Infrastructure technologique pour la recherche d'excellence en robotique	ESRE	12,0
T-REFIMEVE	2021	Time-frequency shared service on optical fibre network	ESRE	9,9
UNION	2010	Optique Ultrarapide, Nanophotonique et Plasmonique	EQPX	11,0
UTEM	2011	Microscopie électronique ultrarapide en transmission	EQPX	3,3
Les Laboratoires d'Excellence (LabEx)				
ACTION	2011	Systèmes intelligents intégrés au cœur de la matière	LABX	5,8
ARCANE	2011	Grenoble, une chimie bio-motivée	LABX	6,6
CeTisPhyBio	2011	Des cellules aux tissus: au croisement de la Physique et de la Biologie	LABX	7,5
CeLyA	2010	Lyon Acoustics Centre	LABX	8,9
CEMPI	2011	Centre Européen pour les Mathématiques, la Physique et leurs Interactions	LABX	3,7
EMC3	2010	Energy Materials and Clean Combustion Center	LABX	19,3
FIRST-TF	2010	Network of Facilities for Innovation, Research, Services and Training in Time & Frequency	LABX	9,7
GRAL	2010	Grenoble Alliance for Integrated Structural Cell Biology	LABX	8,3
LANEF	2010	Laboratory of Alliances on Nanosciences - Energy for the Future	LABX	6,2
MATISSE	2010	MATerials, InterfaceS, Surfaces, Environment	LABX	11,0
MINOS Lab	2010	Minattec Novel Devices Scaling Laboratory	LABX	5,2
Nano-Saclay	2010	Paris-Saclay multidisciplinary Nano-Lab	LABX	12,5
NIE	2011	Nanostructures en Interaction avec leur Environnement	LABX	4,8
PALM	2010	Physics: Atoms, Light, Matter	LABX	17,7
PRIMES	2011	Physique, Radiobiologie, Imagerie Médicale et Simulation	LABX	12,8
SEAM	2010	Science and Engineering for Advanced Materials and devices	LABX	9,9
Sigma-LIM	2010	From specific ceramic materials and components to integrated, secured and intelligent communication systems	LABX	11,4
WIFI	2010	Institut Langevin : Ondes et Images, du Fondamental à l'Innovation	LABX	8,3
Les Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR)				
PEPR DIADEM				
LIBELUL	2022	LIBS for Elemental high throughput analysis / pour l'analyse élémentaire haut débit	PEXD	0,8
METSA-SET-DIA	2022	AMéliorer des Expériences de Tomographies électroniques à balayage en utilisant des détecteurs à électrons directs et des Algorithmes innovants	PEXD	0,9
PEPR Électronique				
COMPTERA	2022	COMPosants électroniques pour l'imagerie TERAhertz	PEEL	2,6
OFCOC	2022	Optical Frequency Combs On a Chip	PEEL	3,1
RENATECH	2022	ÉQUIPEMENTS RENATECH - PEPR ELECTRONIQUE	PEEL	35,0
RESISTE	2022	capteurS microsystemES electro-mécaniqueS pour environnemenTs sévèrEs	PEEL	2,1
PEPR SPIN				
ADAGE	2022	Augmented Magnetic Sensing	EXSP	1,9
SPINCHARAC	2022	Advanced characterization facilities	EXSP	4,7
SPINCOM	2022	RF spintronics for smart communications	EXSP	1,7
SWING	2022	Spin waves for advanced signal processing	EXSP	1,6

Tableau 2 (suite). Principaux projets de France 2030 traitant, pour tout ou partie, du développement de capteurs.
Le montant de l'aide allouée correspond au montant total du projet.

ESRE : Équipement structurant pour la recherche ; EURE : École universitaire de recherche.

Projets financés dans le cadre des actions EquipEx et ESR/EquipEx+

Les exemples de projets présentés ci-dessous permettent d'illustrer les différents thèmes déjà évoqués dans la partie précédente.

Imager, détecter le vivant

Dans le domaine des nouveaux systèmes d'imagerie par microscopie électronique à transmission appliquée à des objets de la biologie préparés par cryogénéisation, les projets de cryo-microscopie, comme France-Cryo-EM et CACSICE, ont pour objectif de rattraper le retard de la France dans ce domaine.

- Le projet ESR/EquipEx+ France-Cryo-EM, coordonné par le CNRS et impliquant l'université de Strasbourg et les centres synchrotron de l'ESRF et de SOLEIL, a pour but de coconstruire trois nouveaux cryo-microscopes avec l'entreprise Thermo-Fischer-Scientific.
- Un équipement semblable a été installé en 2019 à l'institut Pasteur dans le cadre du projet EquipEx CACSICE. Après la colonne de microscopie elle-même, les caméras sont les premiers éléments clés. Les performances de détection directe des électrons s'améliorent chaque année grâce à l'évolution des capteurs CMOS (gain en rapidité et sensibilité), les rendant obsolètes après 3 à 5 ans. En coordination avec les groupes détecteurs des centres synchrotron, les capteurs de très haute performance que sont ces caméras seront installés et testés en collaboration avec Thermo-Fischer-Scientific. Cette stratégie de mise à niveau d'un système de détection de haute performance permet de maintenir à moindre coût (environ 10 % du coût du microscope) les performances du microscope aux normes les plus récentes.

D'autres projets EquipEx et ESR/EquipEx+ sont concernés par les cryo-microscopes mais ils sont moins impliqués dans le co-développement des caméras avec les manufacturiers.

Microscopies et imageries à l'échelle nano

Les projets 2D-MAG, coordonné par l'Université de Montpellier, et e-DIAMANT, coordonné par l'ENS Paris-Saclay, ont pour but le développement d'un nouveau type de capteurs magnétiques fondé sur les centres NV dans le diamant. À la différence des nombreux EquipEx et ESR/EquipEx+ ne faisant qu'intégrer des capteurs déjà élaborés dans des instruments complexes, le cœur de ces deux projets est le développement de nouveaux capteurs magnétiques assuré par la maîtrise de la croissance du diamant et de l'implantation post-croissance. Le but est de mesurer des inductions magnétiques dans la plage des nT avec une résolution spatiale inférieure à 20 nm. Cela a déjà conduit à une nouvelle imagerie magnétique à l'échelle nanométrique basée sur une plateforme AFM. On s'attend à ce que cela révolutionne notre compréhension actuelle des matériaux magnétiques, qu'ils soient fabriqués pour le développement de dispositifs spintroniques ou utilisés comme clé de lecture pour l'histoire de la Terre et des planètes.

Ces deux projets ont pour but de maintenir la France comme leader de cette nouvelle spectroscopie et de son imagerie magnétique associée.

THz, peigne de fréquence, ondes en milieux complexes

Le projet EquipEx Oscillator IMP, coordonné par l'Université Bourgogne-Franche-Comté (UBFC) a pour but de développer des systèmes de petite taille permettant de mesurer le temps avec précision sur des intervalles assez courts, allant de la nanoseconde à la journée.

Le projet a développé des instruments permettant cette mesure du temps et les applications se retrouvent dans de très nombreux domaines de l'astrophysique aux robots aspirateurs domestiques, de la physique nucléaire à la radionavigation et de la photonique micro-onde à la détection radar. Oscillator IMP s'inscrit dans l'infrastructure de recherche REFIMEVE²³ dont le but est de transmettre sans dégradation, via le réseau de fibres optiques de RENATER, un signal de fréquence ultrastable et exact généré par le SYRTE, laboratoire national de métrologie Temps-Fréquence, avec une précision pouvant atteindre 17 à 18 chiffres significatifs. Les développements des instruments temps/fréquence d'Oscillator IMP sont rendus accessibles partout en France grâce à leur distribution par REFIMEVE.

Capteurs frugaux

L'ESR/EquipEx+ TERRA FORMA, coordonné par le CNRS, a pour but de concevoir des observatoires in situ couplant des capteurs renseignant sur les dynamiques humaines, biotiques et abiotiques. Ce projet s'appuie sur des avancées technologiques pionnières et matures pour mettre au point un réseau évolutif de capteurs environnementaux intelligents, connectés, peu coûteux, à faible impact, respectueux de la vie privée et socialement acceptés. Ces capteurs dont le développement est au cœur du projet, doivent capturer le comportement, le métabolisme et la trajectoire des systèmes socio-écologiques et des biotes à partir des états et des flux de matières liquides, gazeuses et solides. Un des maîtres mots pour la mise en réseau des capteurs est leur faible coût, lié entre autres à l'utilisation des imprimantes 3D.

23. L'Institut de Recherche REFIMEVE s'est construit principalement grâce au financement de deux projets France 2030 REFIMEVE+ en 2012 et T-REFIMEVE en 2021.

Projets financés dans le cadre de l'action Laboratoires d'Excellence

Parmi les LabEx financés qui ont donné lieu à un développement instrumental innovant, citons quelques exemples dans lesquels cette activité a eu une place significative :

- Le LabEx **WIFI** (Waves and Imaging: From Fundamentals to Innovation) associé à l'Institut Langevin, qui en s'appuyant sur ses compétences dans le domaine de la physique des ondes acoustiques, électromagnétiques et optiques, a permis de concevoir des instrumentations innovantes, notamment dans le domaine de la biologie/santé, mais aussi en géophysique ou en électronique. Sept startups ont été créées en s'appuyant sur des résultats obtenus dans le cadre de ce LabEx, dont trois proposent des solutions innovantes en termes d'imagerie :

- Abbelight²⁴ qui développe des solutions innovantes en microscopie de superrésolution (SMLM - *Single Molecule Localisation Microscopy*) et en imagerie à l'échelle nanoscopique pour des applications dans le domaine du vivant ;
- ICONEUS²⁵ qui développe une technologie d'imagerie ultrarapide des flux sanguins cérébraux pour visualiser le fonctionnement du cerveau et permettre de détecter des troubles neurologiques ;
- SharpEye²⁶ qui vise à développer un dispositif médical innovant imageant les cellules de l'œil pour un diagnostic amélioré de diverses pathologies (vieillesse, rétinopathie diabétique, occlusions vasculaires, maladies héréditaires et inflammatoires).

- Le LabEx **ACTION** (Systèmes intelligents intégrés au cœur de la matière) qui visait à explorer les potentialités des nanotechnologies et du numérique pour développer des systèmes miniaturisés dotés de nouvelles fonctionnalités pour des applications dans le domaine de la santé, des transports, de l'énergie. Cette miniaturisation doit permettre aux technologies d'intégrer des capteurs connectés entre eux et ouverts sur le monde extérieur, des ordinateurs, des logiciels, etc., afin de concevoir des systèmes dits intelligents, s'adaptant pour mieux répondre aux usages. Le programme de travail était découpé en quatre axes dont un totalement dédié aux capteurs intelligents (*Smart Sensors*) et un autre qui intégrait partiellement ce sujet (*Smart Skins*). Les travaux menés dans ce cadre ont suscité de nombreux développements dans le domaine de l'instrumentation et des capteurs. On peut donner comme exemple la mise au point d'un premier capteur SPR (*Surface Plasmon Resonance*) à interopérateur de phase ultrasensible et à caractère nomade, qui était une rupture technologique ayant donné lieu au dépôt d'un brevet. Le LabEx a été intégré depuis 2018 dans l'EUR EIPHI (Engineering and Innovation through Physical Sciences, High-technologies, and cross-disciplinary research) qui continue à soutenir ce type d'activité, avec par exemple, les projets DNA-Heritage (High speed atomic force microscopy for dynamic and structural monitoring of DNA protein mutations) ou EITAG (Electrical impedance tomography).

- Le LabEx **ARCANE** (Chimie bio-inspirée) n'avait pas d'axe scientifique dédié à l'instrumentation, mais a tout de même soutenu des travaux de recherche destinés à développer, améliorer ou

adapter des outils de mesure et de caractérisation pour les besoins thématiques du LabEx. Ainsi, sur les 61 thèses²⁷ soutenues par le LabEx entre 2012 et 2024²⁸, au moins 16 étaient dédiées à l'innovation en imagerie ou instrumentation. Depuis 2018, le LabEx est intégré à l'EUR **Graduate School CBH** (Chemistry – Biology – Health).

- Le LabEx **Cell(n)Scale** (From Cells to Tissues: where Physics meets Biology), associé à l'Institut Curie, qui vise globalement à tirer parti des outils et des concepts physiques et chimiques pour répondre à des questions clés sur les fonctions et la dynamique des cellules et des tissus. Même s'il n'y avait pas non plus d'axes spécifiquement dédiés au développement de l'instrumentation, des travaux de ce type ont été réalisés dans le cadre de ce LabEx et ont par exemple donné lieu à la création de la plateforme logicielle DIVA (Data Integration and Visualization in Augmented and Virtual Environments) pour l'analyse d'images de microscopies complexes, conduisant à la création d'une start up.

- Le LabEx **PRIMES** (Physique, Radiobiologie, Imagerie Médicale et Simulation) qui avait pour objectifs de développer de nouveaux concepts pour l'exploration, le diagnostic et la thérapie du cancer et des pathologies du vieillissement. PRIMES recouvrait des domaines allant de la physique et la radiobiologie vers l'application clinique en intégrant les aspects d'instrumentation, de stratégies d'acquisition, reconstruction d'images et traitement de données, simulation et modélisation informatique. Dans son programme de travail, figuraient notamment les techniques d'imagerie innovantes (WP2) qui visaient à développer de nouveaux instruments et de nouvelles modalités d'imagerie, notamment en hybridant plusieurs techniques.

- Le LabEx **CeLyA** (Lyon Acoustics Centre), spécialisé dans le domaine de l'acoustique, avec comme champ d'application en instrumentation innovante l'imagerie acoustique ou hybridée avec d'autres approches comme la photo-acoustique. Sur ce sujet, des travaux conjoints avec le LabEx PRIMES, ont été menés avec comme application visée le diagnostic médical. Se sont aussi adossés à ce LabEx des Labcoms dans le domaine de l'instrumentation :

- ATYSCrea, entre CREATIS et l'entreprise Atys Médical, centré sur l'instrumentation ultrasonore médicale pour le Doppler transcranien et l'imagerie échographique haute fréquence ;
- IMAGE4US, entre le laboratoire CREATIS et l'entreprise DB-SAS, pour travailler sur un système d'imagerie médicale ultrasonore 3D.

24. <https://www.abelight.com/>

25. <https://iconeus.com/>

26. <https://psl.eu/startup-des-laboratoires/sharpeye>

27. Par exemple, El-dahshan O. Synthèse et caractérisation avancée de boîtes quantiques Ag2S pour l'imagerie in vivo ou Fibrilles amyloïdes et hydrogels décorés de peptides comme cils olfactifs biomimétiques pour l'amélioration de la sensibilité du nez électronique.

28. <https://arcane.univ-grenoble-alpes.fr/opportunities-calls/past-calls/past-phd-calls>

Les Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR)

Trois Programmes et Équipements de Recherche de France 2030, détaillés ci-dessous, intègrent des projets de recherche en lien avec les thématiques des capteurs.

Lancés en 2021, les Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) sont des programmes d'ampleur nationale ayant pour ambition de positionner la recherche française au meilleur niveau mondial. Dotés d'un budget total de trois milliards d'euros sur des périodes de cinq à dix ans, ils visent à structurer et à consolider les communautés scientifiques nationales dans des domaines scientifiques ou technologiques potentiellement liés à des transformations économiques, sociétales, sanitaires ou environnementales majeures. Les PEPR des stratégies nationales, dotés de deux milliards d'euros et pilotés par de grands établissements nationaux, constituent le volet amont d'une vingtaine de stratégies décidées par l'État. Les PEPR exploratoires, dotés d'un milliard d'euros, sont lauréats d'un appel à programmes. Portés et pilotés par les établissements nationaux de recherche, ils adressent des domaines scientifiques émergents, définis comme prioritaires par l'État.

Trois PEPR ont ainsi donné lieu au financement de projets visant spécifiquement au développement de capteurs : le programme de recherche exploratoire Matériaux émergents (DIADEM), le programme de recherche Électronique ainsi que le programme de recherche exploratoire Spintronique (SPIN).

Le PEPR exploratoire Matériaux émergents DIADEM

Le Programme de recherche exploratoire DIADEM²⁹ vise à accélérer la conception et la commercialisation de matériaux plus performants, durables, et issus de matières premières non critiques et non toxiques, pour des applications diverses telles que l'énergie, le transport, le numérique ou la santé. Piloté par le CEA et le CNRS, DIADEM dispose d'un budget de 85 millions d'euros pour une durée de 8 ans. Il repose sur la création d'équipes et de centres de compétences intégrés, utilisant des plateformes expérimentales de synthèse, de mise en forme et de caractérisation à haut débit, couplées à des outils numériques de modélisation et d'intelligence artificielle (IA).

Ce PEPR s'appuie sur la mise en place d'un réseau de plateformes distribuées sur le territoire, le DIADEM DISCOVERY HUB. Pour ce faire, 17 projets démonstrateurs ont été lancés entre 2022 et 2024. Ils sont axés, d'une part, sur la synthèse à haut débit de nouveaux matériaux, l'ingénierie des surfaces, la caractérisation à haut débit de propriétés des matériaux (chimique, structurale, optique, magnétique, etc.) et, d'autre part, sur la simulation numérique des matériaux. Le premier appel à projets 2023 a permis de sélectionner 17 projets complémentaires et un deuxième appel à projets en cours finalisera le déploiement du PEPR.

Toutes les familles de matériaux sont concernées par le PEPR et certains projets visent plus spécifiquement à apporter des innovations significatives dans le développement de capteurs. À titre d'exemple, le projet METSA-SET-DIA³⁰ a pour but le développement de trois techniques de Tomographie dans un microscope électronique à transmission en mode Balayage (*Scanning Electron Tomography : SET*), les rendant ainsi plus rapides, performantes et automatiques.

Autre exemple dans le domaine des lasers est le projet LIBELUL³¹ qui vise à développer deux expériences « plateformes » exploitant la technologie LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*) dont le principe consiste à analyser le spectre d'émission de fluorescence du plasma induit par l'ablation du matériau à analyser par une impulsion laser.

Le PEPR Electronique

Le PEPR Électronique³², piloté par le CNRS et le CEA, a pour but de stimuler la recherche académique sur le développement de nouveaux composants et systèmes électroniques et photoniques. Son objectif est de porter des technologies à maturité de niveau 4. Il est doté de 81 millions d'euros et comporte, d'une part, un volet de renforcement et de mise à niveau des équipements dans le cadre du réseau RENATECH³³ et, d'autre part, d'un volet scientifique de 42 millions d'euros organisé en quatre grandes thématiques : la perception numérique, l'électronique pour la conversion, les composants pour les télécommunications et, enfin, l'électronique pour le calcul. Neuf projets ciblés et trois actions transverses ont démarré en septembre 2022. Quatre nouveaux projets³⁴ (suite à l'appel ouvert du PEPR en juin 2023) complètent désormais ce volet scientifique.

29. <https://www.pepr-diadem.fr/>

30. <https://www.pepr-diadem.fr/projet/metsa-set-dia/>

31. <https://www.pepr-diadem.fr/projet/libelul/>

32. <https://www.pepr-electronique.fr/>

33. <https://anr.fr/ProjetIA-22-PEEL-0015>

34. <https://www.pepr-electronique.fr/apres-laap-4-nouveaux-projets-contractualises/>

Parmi les projets ciblés, citons d'abord le projet RESISTE³⁵ visant à développer une filière nationale pour les capteurs micro-électromécaniques MEMS. Ces derniers sont destinés à fonctionner en environnement sévère où règnent, par exemple, de hautes températures, des atmosphères corrosives, des radiations, des forces ou des accélérations très élevées (diamant ou SiC). Le projet COMP-TERA³⁶, quant à lui, vise le développement de composants avancés pour les futurs systèmes d'imagerie multispectrale en gamme THz (0,3-30 THz) qui feront appel à des technologies très variées, à la frontière de l'électronique et de l'optoélectronique. Les nouvelles sources de lumières sont aussi en amont des problèmes de capteur et d'imageur. Par exemple, le projet OFCOC³⁷ de l'axe « Électronique pour la conversion » a pour objectif de développer des peignes de fréquence intégrés large bande, robustes, fiables et miniaturisés sur une plateforme à base de semi-conducteurs pour des capteurs autonomes (par ex. qualité de l'air, présence de virus).

Le PEPR exploratoire Spintronique (SPIN)

Le PEPR SPIN³⁸, coordonné par le CEA et CNRS, est un programme exploratoire visant à soutenir une recherche innovante dans le domaine de la spintronique en vue de développer un monde numérique plus frugal, agile et durable. Ce programme, doté de 38 millions d'euros et d'une durée de huit ans, vise des secteurs industriels tels que le stockage de données, la cybersécurité, l'automobile, l'intelligence artificielle, l'aéronautique, la robotique, les biotechnologies ou encore le biomédical. Cinq projets ciblés et trois projets transverses sont à ce jour en cours et un premier appel à manifestation d'intérêt est à prévoir pour mars 2026.

Parmi ces projets ciblés, le projet ADAGE, coordonné par le CEA, a pour but de concevoir et de réaliser de nouveaux capteurs magnétiques fondés sur les principes de l'électronique de spin. En effet, les capteurs utilisant la spintronique, de par leur haute sensibilité, leur taille de l'ordre du micron, leur compatibilité avec le procédé CMOS et leur faible coût, sont déjà largement mis en oeuvre pour des applications dans les domaines de l'automobile, de l'énergie, de l'électronique grand public, de la santé et de la défense. Les partenaires du projet ADAGE souhaitent développer une nouvelle génération de capteurs spintroniques aux fonctionnalités accrues : plus sensibles, de faible puissance, agiles et polyvalents. Ce projet permet également de positionner la France sur l'échiquier mondial puisqu'il n'existe actuellement que trois pôles auxquels les industriels s'adressent pour des développements originaux : la France, l'Allemagne et le Japon.

35. <https://anr.fr/Projet/A-22-PEEL-0002> https://www.pepr-electronique.fr/projet_cible_resiste/

36. <https://anr.fr/Projet/A-22-PEEL-0003> https://www.pepr-electronique.fr/projet_cible_comptera/

37. <https://anr.fr/Projet/A-22-PEEL-0005> https://www.pepr-electronique.fr/projet_cible_ofcoc/

38. <https://www.pepr-spin.fr/>

Partie 3

LA PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Cette partie s'intéresse spécifiquement à une des dimensions de l'impact des projets de recherche soutenus par l'ANR, celle relative à la production scientifique vue à travers le prisme des publications produites dans le cadre de ces projets. Elle vise à donner un aperçu des principaux enseignements que l'on peut tirer des approches bibliométriques³⁹. Pour des résultats plus détaillés et une présentation des aspects méthodologiques, il convient de se référer à l'analyse complète⁴⁰. Ici, seules les grandes lignes de l'étude et ses principales conclusions sont exposées.

Quelques points méthodologiques

Toute étude bibliométrique se confronte tout d'abord au choix de la base de données qui recense les publications à analyser. Pour cette étude, nous avons utilisé deux bases, OpenAlex et le Web of Science (WoS). Le tableau 4 indique les nombres de publications repérées et associables à des projets de l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation » évalués au sein du CE42 (principalement via le champ des remerciements), selon la base de données utilisée et selon le découpage thématique adopté dans ce cahier pour répartir les projets de l'axe. Ces projets sont associés à au moins 283 publications possédant des DOI et parues entre 2019 et 2023, dont 12 ne se retrouvent que sur OpenAlex.

La comparaison des deux bases de données montre des différences assez significatives d'indexation par type de publication : par exemple, des publications qui apparaissent comme *preprints* sur OpenAlex sont classées en *Proceedings Papers* sur le WoS. Et, sur OpenAlex, il existe quelques doublons d'une même

publication, comme par exemple celles qui ont été faites dans des revues en langue non anglaise et qui peuvent apparaître à la fois dans leur version originale et dans leur traduction anglaise comme deux publications distinctes.

La dynamique de publication observée reflète la « jeunesse » de l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation ». Cette production scientifique ne commence à devenir significative qu'à partir de 2021, avec un peu plus de 40 publications recensées cette année-là, pour atteindre plus d'une centaine en 2023. Évidemment, ce sont les projets les anciens qui ont été les plus prolifiques à ce stade, les publications commençant surtout à paraître à compter de la deuxième année d'un projet, et se poursuivent souvent au-delà de sa clôture.

Des connexions entre projets à travers des publications conjointes

L'association des projets aux publications permet, comme retombée collatérale de cette étude bibliométrique, d'identifier des liens entre projets ANR (et aussi entre projets ANR et projets soutenus par un autre guichet, régional, national comme l'ADEME ou BPIFrance ou européen), lorsqu'une même publication remercie plusieurs projets.

Presque la moitié des publications recensées des projets de l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation » sont associées à d'autres projets ANR, le nombre de projets concernés par ces copublications est très significatif : quasiment les deux tiers des projets ayant des publications (50 sur 78). Ainsi, si on se limite aux projets de l'axe

Cluster	Nombre de projets financés dans l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation »	Nombre de publications sur OpenAlex	Nombre de publications sur le WoS
1. Imager, détecter le vivant			
1.1. Imageries et microscopies en biologie	18	45	44
1.2. Micro et nanosystèmes en interface avec le vivant	13	21	20
1.3. Techniques électrochimiques et biochimiques pour la détection de molécules dans le vivant, la santé et l'environnement	12	41	40
2. Microscopies, imageries spectroscopiques à l'échelle nano			
2.1. Nanosciences en champ proche pour la physique du solide	28	43	40
2.2. Microscopies électroniques et caractérisation des nanomatériaux	19	38	36
3. THz, peigne de fréquence, ondes en milieux complexes			
	20	22	20
4. Capteurs et détecteurs			
4.1. Mécanique, rhéologie, température, champ magnétique	13	16	16
4.2. Contrôle non destructif	6	2	2
4.3. Capteurs, actuateurs, microdispositifs intégrés	10	23	22
4.4. À visée instrumentation hautes énergies, spatial	5	8	8
4.5. À visée technologies pour la santé	8	24	23
Total	152	283	271

Tableau 4. Distribution des publications selon les bases de données et les thématiques des projets sources

39. Le document est consultable via le lien suivant : <https://anr.fr/fileadmin/documents/2025/ANR-Capteurs-etude-bibliometrique.pdf>.
40. *Ibid.*

« Capteurs, imageurs et instrumentation », on observe que SAW-GOOD et WISSTITWIN ont trois publications en commun et IMPULSE et SpinE, une publication conjointe. Surtout, cette méthode permet d'identifier de très nombreux autres projets associés à des projets de l'axe. Par exemple, 3DPolariSR, qui a eu des copublications avec 16 autres projets ANR sur la période 2019-2023, tant financés par l'Appel à projets générique (AAPG) (et relevant d'axes scientifiques très divers, dans les domaines des matériaux, des nanosciences, de la biologie ou de la micro-électronique) que dans le cadre de France 2030 (LabEx BRAIN et WIFI, infrastructure nationale en biologie-santé France-Bioimaging, Institut Convergences CENTURI et Equipex+ IDEC).

Un large spectre de disciplines représentées

Les autres résultats importants de cette étude bibliométrique s'appuient sur l'utilisation de classifications thématiques des publications disponibles sur les bases OpenAlex et WoS. Ces classifications ont été réalisées en utilisant les relations de citations entre publications, ce qui permet de les regrouper en macro/meso/micro-champs, via l'algorithme de clustering de Leiden⁴¹.

En particulier, on s'est servi de la classification en micro-champs présente sur OpenAlex pour voir comment se cartographiait la production scientifique issue des projets de l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation » et si cette cartographie recoupait la classification thématique des projets. Là encore, on renvoie le lecteur vers le rapport complémentaire pour plus de détails, notamment sur les aspects méthodologiques, mais l'utilisation de ces classifications a permis de tirer plusieurs enseignements importants.

Elle montre que la production scientifique des projets de l'axe se répartit sur un large spectre de disciplines, corroborant la variété des projets et le caractère souvent pluridisciplinaire des recherches associées, à l'interface par exemple entre la biologie et la physique.

Toutefois, cette production scientifique est plus importante dans certains champs spécifiques, soit parce que plusieurs projets y ont contribué (par exemple, le champ *Fluorescence Microscopy Techniques* dont les 11 publications recensées proviennent de six projets différents), soit parce qu'ont été financés un ou deux projets particulièrement prolifiques (par exemple, le champ *Breath Analysis Technology* avec le projet OBP-optinose).

D'autres projets en relation avec l'instrumentation identifiés

Dans les champs les plus fournis en publications issues de l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation », nous avons cherché si d'autres publications étaient associées à des projets financés en dehors de cet axe, soit dans le cadre d'un autre axe de l'AAPG, ou dans d'autres types d'appels, voire dans le cadre des Programmes d'investissement France 2030. On observe que la part de ces publications dans l'ensemble de la production nationale dans ces champs devient au fil des ans très importante⁴² : dans cinq des micro-champs les plus significatifs pour cette étude, au moins un tiers des publications nationales peut être associé à des projets ANR sur la période considérée. Même si certains champs sont moins bien couverts mais globalement, la couverture reste très bonne. La part associée à des projets de l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation » reste encore modeste, sauf dans les

micro-champs « détection électrochimique des ions de métaux lourds », « imagerie quantitative des cellules vivantes par holographie », « biocapteurs à ondes acoustiques et résonateurs à film mince », « surveillance de l'intégrité des matériaux par ondes guidées », « technologie des détecteurs à scintillation »⁴³. On peut noter, comme le suggèrent les noms de ces cinq champs, que l'instrumentation y occupe une place centrale importante, même s'ils agrègent aussi, en général, des publications sur des sujets sans lien avec l'innovation en instrumentation.

De très nombreux projets financés en dehors de l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation », soit avant sa création en 2017, soit en parallèle, ont pu être identifiés en examinant ces microchamps caractéristiques des domaines de l'instrumentation, de l'imagerie et des capteurs. Certains projets France 2030 ont fortement contribué à cette production scientifique liée à l'instrumentation comme le LabEx ACTION associé à plus de 100 publications dans ces champs. Cette analyse bibliométrique démontre aussi que le financement de projets contribuant à des innovations en instrumentation n'est pas l'apanage de l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation », d'autres axes de l'AAPG pouvant aussi accueillir de tels projets : notamment d'une part, les axes « Nano-objets et nanomatériaux fonctionnels, interfaces » (CE09) et « Micro et nano-technologies pour le traitement de l'information et la communication » (CE24), voire d'autres axes focalisés sur les sciences de la matière (la physique notamment), et d'autre part des axes visant des applications dans les domaines de la biologie et de la médecine, comme « Caractérisation des structures et relations structure-fonctions des macromolécules biologiques » (CE11) et « Technologies pour la santé » (CE19) respectivement, d'axes à l'interface entre biologie/santé et science du numérique, comme « Mathématiques et sciences du numérique pour la biologie et la santé » (CE45) et « Innovations scientifiques et technologiques pour accompagner la transition écologique » (CE04) sur le sujet de la métrologie environnementale. Toutefois, il est clair aussi que, depuis la création de l'axe « Caractérisation des structures et relations structure-fonctions des macromolécules biologiques », une grande partie de ce type de projets y a trouvé sa place.

41. Cet algorithme est également utilisé pour la production chaque année des classements de Leiden des Universités.

42. Cette étude met aussi en évidence l'importance du choix de la base de données et du corpus de référence utilisé, qui ont des conséquences majeures sur les conclusions obtenues. Ainsi, la part des publications associées à des projets ANR dans l'ensemble des publications nationales sur une période donnée dépend des types de publications considérées : notamment, elle est significativement plus importante si l'on filtre sur des papiers publiés dans des journaux ou proceedings à comité de lecture que si l'on prend toutes les publications ayant un DOI recensées sur OpenAlex. À noter que les auteurs du classement de Leiden des Universités pratiquent également ce type de sélection pour calculer leurs indicateurs et n'utilisent pas l'ensemble de la base OpenAlex (<https://open.leidenranking.com/information/indicators>). Voir le document annexe <https://anr.fr/fileadmin/documents/2025/ANR-Capteurs-etude-bibliometrique.pdf> pour plus de précisions sur ce point majeur.

43. *Electrochemical Detection of Heavy Metal Ions / Quantitative Imaging of Living Cells with Holography / Acoustic Wave Biosensors and Thin Film Resonators / Guided Wave Structural Health Monitoring in Materials / Scintillation Detector Technology.*

Développement instrumental et application : deux dimensions associées au sein des projets

Un autre enseignement majeur de l'étude des micro-champs montre que la science n'est pas segmentée entre d'une part le développement instrumental innovant, d'autre part ses usages. En effet, la plupart des micro-champs étudiés agrègent un large spectre de publications qui va de la description des principes fondamentaux en physique ou en chimie, jusqu'à des applications spécifiques, en passant par des développements instrumentaux innovants fondés sur ces principes.

Rappelons que ces micro-champs sont construits à partir des citations entre publications : ces agrégations montrent comment s'organisent et se développent les champs scientifiques, souvent à partir d'un article fondateur qui a mis en évidence un nouveau principe et sur lesquelles vont se développer différentes voies de recherche dont celles qui vont utiliser ce principe pour mettre au point de nouveaux types d'instrumentation. Enfin, par le biais de cette étude bibliométrique, on observe que des projets dont l'objectif principal affiché était d'étudier des phénomènes ou propriétés en biologie, en physique, en science des matériaux... ont permis d'améliorer des instruments de mesure ou de caractérisation ou des capteurs, et, symétriquement, des projets qui étaient focalisés sur le développement d'une instrumentation innovante (y compris des projets financés dans le cadre de l'axe « Capteurs, imageurs et instrumentation »), ont produit des publications cherchant à démontrer leur intérêt sur des cas d'usages spécifiques.

Partie 4

SÉLECTION DE PROJETS FINANCÉS PAR L'AXE « CAPTEURS, IMAGEURS ET INSTRUMENTATION » DE L'APPEL À PROJETS GÉNÉRIQUE

À travers une sélection de projets, ce *cahier de l'ANR* met en lumière des avancées scientifiques majeures, qu'il s'agisse de l'imagerie du vivant à l'échelle nanométrique, ou encore du développement de capteurs de pointe.

Les vingt exemples présentés ci-après témoignent de la richesse et du dynamisme de la recherche dans ce domaine. En intégrant des approches novatrices et des avancées technologiques de pointe, ils contribuent à repousser les frontières de l'observation et de la caractérisation. Cette sélection offre ainsi un panorama représentatif des enjeux et des perspectives de cette recherche en constante évolution.

Appel à projets générique | 2020

3DPOLARISR

Polarized super-resolution microscopy for live conformational imaging

Le projet 3DPolarISR vise à imager les modifications orientationnelles de protéines en imagerie de fluorescence super-résolutive et polarisée. Le consortium vise la fabrication d'un prototype sous la forme d'un module adaptable à la microscopie optique, transférée à terme au partenaire industriel.

Les avancées du projet couvrent la validation du module, son application à la mesure d'orientation de protéines dans les sites d'adhésion en temps réel, ainsi que les constructions moléculaires afférentes.

Le dispositif 4polar-3D a été validé dans sa version démonstration, et utilisé pour quantifier l'orientation 2D puis 3D de fluorophores marquant l'actine dans des cellules, ou encore attachés à des origamis d'ADN. Une version prototype de ce module est en cours de validation avec le partenaire industriel.

Deux versions de l'algorithme de traitement d'image pour déterminer l'orientation spatiale des molécules ont été développées. La première intègre l'intensité des canaux polarisés, alors que la deuxième est une ingénierie des *Point Spread Function* (fonction d'étalement du point) utilisant le Deep Learning.

Le projet intègre différentes approches biochimiques pour créer un lien rigide entre un rapporteur fluorescent et protéine d'intérêt. Plusieurs rapporteurs et différentes méthodes de rigidification sont en cours de validation. Un criblage a permis d'identifier les modifications à apporter à la protéine fluorescente mEos3.2 pour l'utiliser en fusion rigide avec intégrine, taline et actine. Des tests en 4polar-3D / sptPALM dans des cellules vivantes sont en cours.

Début du projet : 2021 | **Durée :** 48 mois |
Financement ANR : 637 076 €
anr.fr/Projet-ANR-20-CE42-0003
Coordination : Sophie Brasselet |
 UMR 7249, Institut FRESNEL Marseille, CNRS

Appel à projets générique | 2018

NANOMESH

Nanoelectronique graphène pour des interfaces neuronales multifonctionnelles

Bien que très étudié, le système nerveux n'a pas encore livré toutes les clefs de son organisation et de son fonctionnement. Obtenir une cartographie fonctionnelle et multi-échelle sans endommager ou perturber les cellules sondées représente un défi si l'on désire comprendre le transport multi-échelle de l'information dans ces grandes structures. Suivre l'activité électrique du système nerveux nécessite d'enregistrer l'activité simultanée d'une multitude de neurones individuels et de leurs prolongements neuritiques.

Le projet NanoMesh vise à l'implémentation d'une nouvelle nanoélectronique carbonée ultra-sensible et hautement biocompatible, intégrée sur une plateforme multifonctionnelle permettant de suivre la dynamique de circuits neuronaux à ces diverses échelles.

Les matrices de capteurs développées sont à base de monofeuillets de graphène. Ils offrent une combinaison unique de hautes performances : une grande stabilité chimique pour travailler en milieu liquide réactif, une haute sensibilité pour la transduction du signal, une transparence optique dans la gamme visible, et une affinité neuronale exceptionnelle, supérieures aux dispositifs conventionnels. Ces dispositifs ont pu être combinés à des circuits microfluidiques dans lesquels sont réalisées les cultures cellulaires. Couplés aux matrices de capteurs, ils permettent de façonner des architectures modèles et fonctionnelles. Nous avons également montré que l'ensemble est intégrable sur substrat souple et transparent et compatible avec des techniques d'imagerie grand champ ouvrant la voie pour l'étude multi-échelle et multimodale des circuits neuronaux.

Début du projet : 2023 | **Durée :** 48 mois |
Financement ANR : 313 136 €
anr.fr/Projet-ANR-18-CE42-0003
Coordination : Cécile Delacour |
cecile.delacour@neel.cnrs.fr
 UMR 2940, Institut Néel, CNRS

Appel à projets générique | 2019

NANOOLIGO

Nanopore Unique Pour L'analyse
Précoce De L'agrégation de
-Amyloïde précurseur Maladie
D'Alzheimer

Le développement d'outils d'analyse des fibrilles d'amyloïdes, permettant de différencier agrégats et protofibrilles et d'évaluer l'impact de promoteurs ou inhibiteurs, est crucial pour comprendre les facteurs externes sur la maladie d'Alzheimer.

L'objectif général du projet NANOoligo est de proposer une méthode analytique basée sur la technologie nanopore unique pour élucider des questions relatives à l'agrégation de protéines de type amyloïde et à l'impact des pesticides sur cette cinétique.

Le projet a permis de montrer que la détection des amyloïdes A par différent type de nanopores fonctionnalisés ou non permettaient de générer des données visant à différencier la taille des A traversant ces pores. Nous avons ainsi procédé à l'étalonnage de nanopipettes avec une gamme d'amyloïdes fibrillaires et oligomères de taille et de morphologie contrôlées. Cette étude est un élément clé pour avoir une description des espèces détectées par les nanopores, notamment dans le cas de milieu complexe. Le projet NanoOligo a permis de produire une preuve de concept du RT-FAST pour la détection d'agrégats de peptides a et synucléine. Enfin, en combinant les approches nanopore et la fluorescence en molécule unique, nous avons proposé un mécanisme de nucléation secondaire ainsi que décrit l'impact du pyriméthanol sur la phase précoce d'agrégation. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour la mise au point d'un test de diagnostic précoce, mais aussi pour mieux comprendre la phase précoce d'agrégation des amyloïdes encore méconnue.

Début du projet : 2019 | Durée : 54 mois |
Financement ANR : 485 881 €
anr.fr/Projet-ANR-19-CE42-0006

Coordination : Sébastien Balme |
sebastien.balme@umontpellier.fr |
UMR 5635, Institut Européen des Membranes,
Université de Montpellier

Appel à projets générique | 2018

OBP-OPTINOSE

Des OBP pour un Nez
Optoélectronique Biomimétique

Il existe une demande croissante pour la détection de composés organiques volatils (COV), les méthodes traditionnelles, précises, fiables mais laborieuses, nécessitent des équipements coûteux. Les nez électroniques (eN) apparaissent comme une alternative prometteuse mais, à ce jour, leurs performances sont encore limitées.

Le projet OBP-Optinose développe un nouveau eN et améliore considérablement sa sensibilité, sa sélectivité et sa spécificité. Pour cela, nous proposons de concevoir et produire de nouveaux matériaux sensibles inspirés du nez humain, en combinant les avantages de la reconnaissance spécifique et de la réactivité croisée.

Dans un premier temps, des approches numériques ont permis de déchiffrer le mécanisme de liaison entre odorant *binding proteins* (OBP) de « forme sauvage » et COV d'intérêt. À partir des résultats de *docking*, six protéines OBP spécifiques ont été conçues, produites et purifiées et sept autres OBP à réactivité croisée ont été préparées. Leurs propriétés de liaison pour les COV ont été étudiées en phase liquide par la calorimétrie de titrage isotherme (ITC). L'ensemble des OBP ont été immobilisées sur une puce par autoassemblage avec une procédure très reproductible. La technique d'imagerie par résonance des plasmons de surface (SPR) a été choisie pour la détection des COV et l'humidité apparaît comme facteur essentiel pour l'activité des OBP sur puce. Les simulations numériques ont en effet mis en évidence le rôle des molécules d'eau sur la flexibilité de la protéine. Des mesures de dichroïsme circulaire par rayonnement synchrotron ont confirmé que l'OBP conservait sa conformation en phase sèche. Après avoir intégré la puce OBP dans l'imagerie SPR NeOse miniaturisé, l'eN portable possède une très bonne sensibilité et sélectivité pour les COV cibles.

Début du projet : 2019 | Durée : 51 mois |
Financement ANR : 460 613 €
anr.fr/Projet-ANR-18-CE42-0012

Coordination : Yanxia Hou-Broutin |
yanxia.hou-broutin@cea.fr |
UMR 5819, Systèmes Moléculaires et
nanoMatériaux pour l'Énergie et la Santé
(SyMMES), CNRS

Appel à projets générique | 2018

SAWGOOD

Dispositifs sans fils étirables à ondes acoustiques de surface : vers des capteurs passifs multifonctionnels imprimés sur la peau

L'objectif du projet SAWGOOD est de réaliser des capteurs multifonctions « prêts à être tatoués », d'une épaisseur inférieure à 60 µm, passifs, sans batterie, sans fil et sans packaging. Ce projet répond à une nécessité de la société actuelle à savoir connaître en continu les paramètres du corps humain. Pourtant, l'utilisation de fils et/ou de connectiques potentiellement inconfortables dissuade les utilisateurs de porter en permanence ces objets connectés.

De manière à isoler les ondes acoustiques du corps et ainsi assurer le bon fonctionnement du capteur, des structures à ondes acoustiques confinées de type *Waveguiding Layer Acoustic Waves* (WLAW) ont été étudiées. Basées sur un empilement de couches « lentes » et « rapides » (niobate de lithium, oxyde de zinc et nitrure d'aluminium), ces structures isolent les ondes de la surface (*packageless packaging*).

La combinaison de capteurs à ondes élastiques de surface avec des antennes étirables « en méandres » sur élastomère ultrasouple a permis de démontrer pour la première fois une mesure de température avec ce type de capteurs « tatoués » sur le corps humain. Enfin, la combinaison de ces capteurs avec des matériaux magnéto-élastiques permet également de réaliser des capteurs magnétiques de plus en plus sensibles, qui pourraient à terme être compatibles avec la mesure de signaux EMCG.

Début du projet : 2019 | Durée : 48 mois |
Financement ANR : 230 580 €
anr.fr/Projet-ANR-18-CE42-0004

Coordination : Sami Hage-Ali |
sami.hage-ali@univ-lorraine.fr |
 UMR 7198, Institut Jean Lamour, CNRS,
 Université de Lorraine

Appel à projets générique | 2019

SIBI

Comptage d'événements de transfert d'électrons individuels dans les processus électrochimiques : une nouvelle approche en biodétection

L'objectif du projet SIBI est de développer un système de détection « tout électronique » permettant le comptage d'événements de transfert d'électrons uniques, un challenge majeur de la nano-électrochimie. Le projet a montré que le mécanisme de transduction des capteurs E-DNA était contrôlé par la cinétique du transfert d'électrons à l'électrode de la tête redox de l'ADN, et non pas par la dynamique de la chaîne ADN, comme admis jusqu'alors. En particulier, cette réaction de transfert d'électrons est caractérisée par une énergie d'activation remarquablement faible.

Le transfert d'électrons entre brins d'ADN confinés entre deux électrodes permet un mécanisme d'amplification pour détecter des interactions des brins d'ADN avec des molécules cibles. Il a permis de mettre en évidence que les brins d'ADN adoptaient, sous confinement nanométrique, un régime balistique. Un autre résultat inédit a été la mise en évidence de l'existence d'un bruit de grenaille (*shot noise*), superposé au courant électrochimique moyen, traduisant la nature discrète des événements de transfert d'électrons. Ces résultats ouvrent sur l'étude fondamentale du bruit de grenaille redox, et sur son emploi pour les capteurs bio-électrochimiques à l'échelle de la molécule unique.

Début du projet : 2020 | Durée : 48 mois |
Financement ANR : 500 277 €
anr.fr/Projet-ANR-19-CE42-0011

Coordination : Christophe Demaille |
christophe.demaille@u-paris.fr |
 UMR 7591, Laboratoire d'Électrochimie
 Moléculaire, Université Paris Cité, CNRS

Appel à projets générique | 2018

SPECKLESTED

Imagerie de Speckle Super-résolue
à travers des milieux diffusants

Les structures lumineuses aléatoires en tavelures (*speckles*) générées lorsque de la lumière cohérente traverse des tissus biologiques sont donc habituellement perçues comme néfastes pour l'imagerie. Cependant, ces structures complexes contiennent aussi une forte densité de vortex optiques, structures nécessaires pour la microscopie super-résolue de type STED (stimulated-emission-depletion).

La microscopie STED requiert deux faisceaux lasers présentant des contrastes d'intensités inversés pour, respectivement, exciter et désexciter la fluorescence. Le principal enjeu du projet consistait donc à contrôler l'alignement et la synchronisation de deux *speckles* inversés, bien que générés par des lasers de longueurs d'onde différentes.

Le projet a permis de quantifier et de modéliser une forte corrélation spectrale observée dans les milieux diffusant vers l'avant tels que les milieux biologiques. Ce phénomène permet d'obtenir des *speckles* quasiment « achromatiques », c'est-à-dire avec une corrélation large-bande. Les principales avancées réalisées concernent : i) la synchronisation des sources lasers avec le système de balayage de l'échantillon et la détection ; ii) la réalisation de deux *speckles* dits « complémentaires » à deux longueurs d'ondes différentes pour l'excitation de fluorescence et la désexcitation par émission stimulée ; iii) la caractérisation et la calibration des réponses impulsionnelles de l'instrument en fonction de la puissance lasers et des paramètres d'acquisition ; iv) l'imagerie super-résolue en trois dimensions de nano-billes fluorescences et de vésicules intra-cellulaires.

Début du projet : 2019 | Durée : 36 mois |
Financement ANR : 328 580 €
anr.fr/Projet-ANR-18-CE42-0008

Coordination : Marc Guillon |
marc.guillon@u-paris.fr
UMR 8003, Saints-Pères Paris Institute for the
Neurosciences (SPPIN), Université Paris Cité

Appel à projets générique | 2019

VISION

Excitation et imagerie super-
résolution volumétrique confinée à
basse température : étude de
l'architecture du chromosome
durant l'expression des gènes

Le projet VISION vise à développer une nouvelle approche d'imagerie super-résolution (SR) en molécule unique (SM) dans un environnement dense et encombré pour imager l'organisation moléculaire du noyau durant la transcription. Il combine des approches d'imagerie 3D, à des mesures d'orientation à l'échelle de la molécule unique ainsi que de techniques photo-physiques à basse température.

Une nouvelle méthode d'excitation sélective et d'imagerie volumétrique a été développée pour une imagerie efficace de SM dans des milieux denses. Cette méthode a été démontrée par un suivi de dynamiques rapides de SM dans le noyau cellulaire. En plus, un dispositif pour un refroidissement uniforme et rapide des cellules vivantes a été développé, démontrant l'efficacité de l'arrêt à froid et la survie cellulaire quand le système est réchauffé. Des images SR en SM à basse température ont été réalisées. Les études théoriques et expérimentales ont montré la faisabilité de la polarimétrie en molécule unique en combinaison avec une imagerie 3D multifocale (MFM). Le système a été utilisé pour étudier l'évolution de l'organisation de l'ADN durant la spermatogenèse.

Une nouvelle plateforme de visualisation et d'analyse des données multidimensionnelles a été développée (Genuage) et un nouveau plugin ImageJ (*MultiplanFitter*) sera déployé pour la reconstruction et l'analyse des données issues du MFM.

Début du projet : 2019 | Durée : 48 mois |
Financement ANR : 348 300 €
anr.fr/Projet-ANR-19-CE42-0003

Coordination : Bassam Hajj |
bassam.hajj@curie.fr
Laboratoire Physico Chimie Curie, Institut Curie

Appel à projets générique | 2018

CARAMEL

Outil de CARActérisation des propriétés Magnétiques à l'EcheLle nanométrique

Le projet CARAMEL avait pour but de développer un outil unique de caractérisation des propriétés magnétiques de la surface de matériaux à l'échelle nanométrique en combinant des capteurs magnétorésistifs (MR) nanométriques très sensibles avec un microscope à force atomique (AFM). Cet outil avait trois grandes applications innovantes : la nanométrie magnétique, l'imagerie de la susceptibilité et l'imagerie de spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (RMN), qui auront potentiellement des retombées pour la caractérisation non destructive de matériaux et l'étude de structures magnétiques nanométriques notamment.

Les études d'optimisation des capteurs GMR (*Giant Magneto Resistance*) et TMR (*Tunneling Magneto Resistance*), le développement et la stabilisation de la procédure d'intégration des capteurs dans les bras de levier flexibles ainsi que le travail sur l'électronique ont permis de développer un système qui peut être intégré sur n'importe quel AFM commercial ou de laboratoire et qui permet de cartographier simultanément la topographie et les champs de fuite émis par un échantillon de façon quantitative. Des échantillons modèles et des simulations ont permis de valider le microscope qui a ensuite été utilisé pour regarder des échantillons pour des applications différentes : des pétales magnétiques pour l'absorption radio fréquence (Dassault Aviation et IPCMS), des roches magnétiques pour le paléomagnétisme (GET), des rubans de nanocristallin pour des transformateurs électriques (Laboratoire Ampère)...

Début du projet : 2019 | Durée : 36 mois |
Financement ANR : 301 460 €
anr.fr/Projet-ANR-18-CE42-0001

Coordination : Aurélie Solignac |
aurelie.solignac@cea.fr |
UMR 3680, Service de physique de l'état condensé (SPEC), CEA

Appel à projets générique | 2019

DESTINA-ION_OPERANDO

Étude de la Dynamique de Sodiation au sein de particules individuelles de matériaux actifs pour batteries Na-ion par Mesures Operando TEM électrochimique

Le projet DESTINA-ion_Operando a pour objectif de développer des méthodologies instrumentales basées sur la microscopie électronique en transmission (TEM) in situ liquide/électrochimique afin d'étudier la dynamique de lithiation et de sodiation au sein de particules individuelles de matériaux de cathode utilisés dans les batteries. Les réactions d'insertion des ions dans les cristaux présentent des inhomogénéités importantes, qui dépendent fortement des interfaces solide-liquide et solide-solide. Par conséquent, il est essentiel de quantifier ces inhomogénéités de structure et d'étudier leur évolution en fonction de l'état de charge afin de mieux comprendre les processus responsables de la dégradation des batteries. L'objectif est donc de créer une nouvelle approche dans la compréhension des phénomènes limitant les performances des batteries.

Un traitement automatique des données 4D-STEM de clichés de diffraction électronique afin d'améliorer l'identification des phases cristallines présentes à différentes étapes de charge, dans les grains individuels de cathode de batterie Na-ion, a été mis en place. Ce processus permet d'enregistrer les informations de chaque réflexion (intensité, taille, position avec une précision sous-pixelaire de la position [10-3px]) dans un ensemble de données. Cette méthode adaptative réduit le bruit, comprime les données de nano-diffraction et étend son applicabilité à d'autres techniques (analyse de cartographie de contraintes, diffraction électronique 3D). Ce développement a abouti à la construction du logiciel ePattern sur la plateforme FIJI (logiciel libre).

Ce travail expérimental a permis de réaliser les analyses 4D-STEM de la localisation des différentes phases cristallines présentes lors du cyclage électrochimique sur des matériaux de cathode de batteries Na-ion, révélant hétérogénéités spatiales, coexistences de plusieurs phases et interfaces carbone/cathode. Des analyses complémentaires en STXM-XANES sur ces mêmes matériaux ont pu être corrélées avec les données 4D-STEM permettant d'identifier localement les degrés d'oxydation des métaux de transition impliqués dans le processus de sodiation.

Début du projet : 2019 | Durée : 60 mois |
Financement ANR : 535 344 €
anr.fr/Projet-ANR-19-CE42-0014

Coordination : Arnaud Demortière |
arnaud.demortiere@cnrs.fr |
UMR 7314, Laboratoire réactivité et chimie des solides (LRCS), CNRS

Appel à projets générique | 2018

I2T2M

Imagerie opto-acousto-optique in situ tridimensionnelle de transformations de matériaux à l'échelle nanométrique

L'objectif du projet I2T2M concerne l'imagerie 3D in situ, rapide et quantitative des transformations matérielles spatiotemporelles complexes à l'échelle nanométrique par impulsions acoustiques picosecondes cohérentes générées et détectées par laser. Grâce à l'amélioration du microscope optique ultrarapide de l'entreprise NETA, un protocole d'imagerie 3D non invasive par TDBS (diffusion Brillouin dans le domaine temporel) a été implémenté avec ce système pompe/sonde basé sur un échantillonnage optique asynchrone.

L'imagerie 3D de la texture des matériaux polycristallins, incluant les grains de glace d'eau à haute pression, a été réalisée. La première image 3D à haute pression par TDBS avec des ondes acoustiques de cisaillement cohérentes et le suivi en 3D de la croissance d'un polycristal de la glace VII au sein d'un monocristal de glace VI a été obtenue. La grande sensibilité de l'imagerie TDBS a été révélée via l'étude de la dégradation d'un monocristal de LiNbO_3 sous charge non hydrostatique dans une cellule à enclumes de diamant. Les déviations des vitesses acoustiques mesurées dans des agrégats par diffusion Brillouin classique ont également été résolues avec la technique TDBS.

Les développements réalisés ont permis de suivre en temps réel le durcissement d'une résine époxy déposée sur un métal, avec une résolution axiale inférieure à la longueur d'onde optique et à des distances de l'interface sous les dix micromètres, auparavant inaccessibles. Les modifications inhomogènes de l'époxy, causées par chauffage laser ou absorption à deux photons, ont été imagées en 3D avec une résolution axiale et sur des profondeurs similaires. La technique TDBS a aussi permis d'imager une époxy industrielle sur une interface rugueuse.

Ainsi, ces avancées ont rempli l'objectif du projet I2T2M dans des matériaux complexes et variés.

Début du projet : 2019 | Durée : 48 mois |
Financement ANR : 390 708 €
anr.fr/Projet-ANR-18-CE42-0017

Coordination : Vitali Goussev |
vitali.goussev@univ-lemans.fr |
UMR 6613, Laboratoire d'Acoustique de
l'Université du Mans, Le Mans Université

Appel à projets générique | 2018

MACAO

Measurement Accuracy – CAsE of mechanical properties of Oxide nanoparticles

Le projet MACAO a pour objectif de coupler deux techniques expérimentales (tests in situ en microscopie électronique en transmission et spectroscopie Brillouin), avec la simulation numérique pour une meilleure compréhension des propriétés mécaniques à l'échelle nano. Cette approche nécessite d'adapter le système mécanique et de localiser une seule nanoparticule sous le spectromètre.

Les essais réalisés sur le dispositif adapté sur le spectromètre ont montré qu'il était nécessaire d'adopter une approche statistique en augmentant le nombre de mesures afin d'identifier les erreurs inhérentes au système. Il est ainsi essentiel de contrôler le dépôt des nanoparticules sur le substrat afin d'obtenir plusieurs nanoparticules isolées uniquement sur la tranche du substrat et à des distances contrôlées. Il s'est avéré que ce point constituait un verrou. Pour optimiser le dépôt, il est possible de : (i) déposer en phase liquide en adaptant un dispositif pour limiter le dépôt des nanoparticules sur la tranche du substrat, (ii) contrôler l'accroche des nanoparticules. La deuxième option permet de s'assurer de la présence des nanoparticules uniquement sur la tranche et de contrôler la distance interparticules. Une nouvelle collaboration avec des spécialistes de la nano-impression permettant de fonctionnaliser des zones spécifiques de la tranche du substrat a été initiée. Des outils de simulation numérique à l'échelle atomique ont été utilisés pour évaluer les propriétés élastiques ainsi que pour interpréter des comportements plastiques. Une comparaison directe entre simulation et expérience reste pour l'instant délicate.

Début du projet : 2019 | Durée : 48 mois |
Financement ANR : 375 689 €
anr.fr/Projet-ANR-18-CE42-0009

Coordination : Lucile Joly-Pottuz |
lucile.joly-pottuz@insa-lyon.fr |
UMR 5510, Matériaux : Ingénierie et Science
(MATEIS), INSA de Lyon

SPIDER-MAN

Capteur Spectral de Phonons Superdiffusifs

SPiDER-man a pour objectif de développer une nouvelle instrumentation pour l'étude des transferts de chaleur dits ultrarapides ou superdiffusifs dans les matériaux semi-conducteurs et pouvant être décrit par des vols de Lévy. Le projet vise à approfondir les connaissances sur les matériaux innovants et se structure autour de trois points principaux. Un Capteur Spectral de Phonons Superdiffusifs a été mis en place et validé pour la mesure de propriétés thermiques de matériaux nanostructurés et pour la détection de transferts thermiques superdiffusifs dans les alliages. Grâce à une bande passante unique (kHz-THz)[2], les transferts électroniques balistiques ont pu également être mis en évidence.

Des matériaux modèles, à base de Ge:GeMn, de différentes épaisseurs et concentrations ont été élaborés par MBE (*Molecular Beam Epitaxy* ou épitaxie par jets moléculaires). La superdiffusivité de la chaleur n'a pas été observée dans ces structures prouvant qu'une matrice de type alliage est nécessaire pour générer cet effet. De nouvelles élaborations de GeSe ont été entreprises, mais n'ont pu aboutir à ce jour en raison de la complexité des procédés.

Enfin, le projet SPiDER-man a permis de développer une nouvelle méthode de calcul de la conductivité thermique de matériaux et matériaux nanostructurés en combinant les approches de Monte-Carlo et de Green-Kubo. Le couplage avec un modèle des vols de Lévy est actuellement en cours et les premiers résultats montrent les transitions balistique-diffusif dans les matériaux semiconducteurs. Ces effets en fonction de la température sont également étudiés.

Le développement du Capteur Spectral va permettre l'émergence d'une nouvelle métrologie thermique adaptée à l'étude des propriétés des matériaux innovants dont le potentiel favorisera des avancées conséquentes dans de nombreux domaines tels que la micro-électronique, les capteurs ultrarapides.

Début du projet : 2019 | Durée : 54 mois |
Financement ANR : 457 700 €
anr.fr/Projet-ANR-18-CE42-0006

Coordination : Gilles Pernot |
gilles.pernot@univ-lorraine.fr |
UMR 7563, Laboratoire énergies & mécanique
théorique appliquée (LEMTA), Université de
Lorraine

COQTEL

Corrosion Quantification Trough Extended use of Lamb waves

Les dommages induits par un couplage corrosion-fatigue (CC&F) sont problématiques en aéronautique. Des revêtements spécifiques sont utilisés pour les limiter, mais leurs performances restent insuffisantes. Les inspections visuelles ne permettent pas de détecter les prémices de ces dommages ni de prédire la durée de vie restante des pièces. Le projet COQTEL propose de passer d'un contrôle non destructif classique à une maintenance conditionnelle en embarquant des éléments piézoélectriques (PZT) dans des pièces aéronautiques métalliques en développant des équipements et des algorithmes spécifiques.

Pour surveiller un dommage de CC&F, le projet COQTEL s'appuie sur des ondes ultrasonores (US) générées et reçues par des PZT via un équipement spécifique. Une méthodologie de corrosion électrochimique basée sur l'apport local de solution corrosive via un capillaire très fin et un pilotage par charge électrique a été mise en œuvre sur de l'acier 316L. Elle permet de produire des piqûres unitaires de corrosion de taille corrélée à la charge électrique injectée à un endroit prédéterminé. Des moyens optiques et électrochimiques sont également mis en œuvre pour suivre in situ l'évolution de ce dommage. Deux expériences indépendantes ont ainsi été réalisées afin d'assurer la répétabilité de l'approche proposée. En conclusion, les ondes de Lamb générées par un réseau PZT clairsemé constituent une approche fiable et efficace permettant de surveiller la croissance des piqûres de corrosion de taille micrométrique. Des essais visant à caractériser le comportement en fatigue de l'acier 316L ont également été réalisés. Un banc d'essai spécifique permettant d'étudier le couplage entre corrosion et fatigue et de générer des dommages de façon contrôlée est en train d'être mis en place en combinant ces deux approches. Si elle était intégrée à des structures aéronautiques, une telle approche pourrait constituer une solution alternative aux procédures de maintenance non destructives actuelles.

Début du projet : 2021 | Durée : 42 mois |
Financement ANR : 413 843 €
anr.fr/Projet-ANR-20-CE42-0014

Coordination : Marc Rébillat |
marc.rebillat@ensam.eu |
UMR 8006, Laboratoire Procédés et Ingénierie
en Mécanique et Matériaux (PIMM), équipe
DYSCO, CNRS

Appel à projets générique | 2018

DEVINS

DEep uV INnovative detector
technologies for Space observations

Les variations UV solaires, notamment celles du continu Herzberg, jouent un rôle important dans le changement climatique régional en interagissant avec la stratosphère (formation de la couche d'ozone) et induisant ainsi des anomalies de température et de vitesse. La variabilité UV représente aussi un apport clé pour la physique solaire.

DEVINS est un projet ambitieux visant à surveiller l'irradiance spectrale solaire du continu Herzberg avec une précision supérieure à 0,5 % (cinq fois meilleure que les précédentes mesures spatiales) et ainsi participer à la caractérisation de l'influence du soleil sur le climat.

Le projet DEVINS a permis de réaliser et de qualifier pour l'observation spatiale les premiers détecteurs UV *solar blind* en oxyde de gallium ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$). Plus de 100 détecteurs ont été réalisés et 4 spatialisés le 15 avril 2023 sur le nanosatellite (2«U», 10x10x20 cm³) du LATMOS, INSPIRE-SAT 7. Les travaux DEVINS ont montré que la bande interdite peut être modifiée par l'ajout d'aluminium, $\beta\text{-(Al)Ga}_2\text{O}_3$, afin d'obtenir des transitions optiques de 253 à 200 nm pour une bande interdite possible de 4,9 eV à 6,2 eV. Le processus de développement est entièrement maîtrisé, de la croissance du matériau jusqu'au conditionnement du dispositif, les performances obtenues sont exceptionnelles (réponse spectrale centrée à 215 nm et très élevée [≥ 100 mA/W @10 V polarisation], réjection pic/250 nm ≥ 1000 , bruit < 5 pA, dynamique remarquable ≤ 20 ms [temps de montée et descente]) et les détecteurs sont maintenant qualifiés spatial TRL9 (ayant volé avec succès).

Après la démonstration de fonctionnement sur INSPIRE-SAT 7 et avec le développement exponentiel des possibilités du « New Space », de multiples opportunités s'ouvrent à ces photodétecteurs en $\beta\text{-(Al)Ga}_2\text{O}_3$ du fait de leur sensibilité (*solar blind*), longévité (résistants aux radiations) et fonctionnement à température ambiante (gain d'énergie). Des satellites pointés permettront de multiplier encore par cinq les performances.

Début du projet : 2018 | Durée : 42 mois |
Financement ANR : 389 309 €
anr.fr/Projet-ANR-18-CE42-0015

Coordination : Luc Damé
luc.dame@latmos.ipsl.fr
UMR 8190, Laboratoire Atmosphères, Milieux,
Observations Spatiales (LATMOS), CNRS

Appel à projets générique | 2019

INSPECTION

Spectroscopie in situ pour la
caractérisation de lubrifiants dans
des contacts roulants chargés

La tribologie a un rôle majeur à jouer dans la réduction de la consommation mondiale d'énergie. Pourtant, le comportement des lubrifiants dans des conditions extrêmes de pression, température et glissement est mal connu et imprédictible. Le projet INSPECTION a permis de développer un banc de spectrométrie Brillouin modulable, permettant de caractériser les lubrifiants sur une large gamme de conditions expérimentales. Ce banc a été mis en place avec un spectromètre utilisant une technologie VIPA. Des essais ont été menés sur plusieurs lubrifiants de nature très différente, au repos et sous pression. Ils ont mis en lumière une forte corrélation entre le plateau de frottement mesuré dans un contact et la transition vitreuse des lubrifiants, quelle que soit leur nature. Les temps de relaxation dérivés des spectres des lubrifiants sous pression ont permis de mettre en évidence le caractère dynamique de cette transition.

Les essais menés sur les lubrifiants cisailés ont permis de caractériser l'influence du cisaillement sur leur réponse à hautes fréquences. Les essais in situ sont programmés dans l'année 2025.

Ce projet a favorisé un rapprochement avec la communauté internationale des brillouinistes à travers la conférence internationale BioBrillouin organisée à Lyon en 2022. Des échanges autour des résultats de ce projet ont également renforcé les liens industriels avec l'entreprise TOTAL autour du comportement *in operando* de lubrifiants additivés.

Début du projet : 2019 | Durée : 48 mois |
Financement ANR : 245 160 €
anr.fr/Projet-ANR-19-CE42-0002

Coordination : Laetitia Martinie
laetitia.martinie@insa-lyon.fr
UMR 5259, Laboratoire de Mécanique des
Contacts et des Structures (LaMCoS), INSA Lyon

Appel à projets générique | 2018

NANOPTIX

Détecteurs à rayons X miniatures
fibrés par couplage de scintillateurs
à des antennes nano-optiques

L'objectif de NANOPTIX est de développer des détecteurs de rayons X intégrés à l'extrémité d'une fibre optique de 70 à 125 µm de diamètre pour créer des dosimètres et des caméras miniatures avec des précisions de mesure à l'état de l'art. Le projet exploite pour la première fois le concept d'antenne nano-optique afin de contrôler la luminescence émise par des scintillateurs sous irradiation. Les détecteurs sont constitués d'une ou plusieurs cellules scintillantes microscopiques couplées à une fibre optique étroite par l'intermédiaire d'une ou plusieurs antennes nano-optiques.

NANOPTIX a permis la mise en œuvre et la démonstration de plusieurs prototypes miniatures. Tout d'abord, une sonde fibrée miniaturisée pour la caractérisation des « petits champs » de radiothérapie externe a permis l'acquisition de la première cartographie bidimensionnelle du plus petit champ de traitement (0,6 x 0,6 cm²). Ensuite, une sonde miniature biocompatible pour le monitoring du traitement du cancer de la prostate par curiethérapie HDR, a montré des performances inégalées en matière de localisation spatiale et temporelle de la source radioactive de traitement (source tracking). Par ailleurs, le développement et la démonstration de dosimètres biocompatibles à sondes multiples pour la surveillance en temps réel, par triangulation, du traitement par curiethérapie HDR a montré des performances de mesure à l'état de l'art. Enfin, nous avons mis en œuvre une brique de base de caméra X fibrée et démontré les performances de la microcaméra élémentaire au Synchrotron SOLEIL : les pixels sont totalement découplés dans le processus d'imagerie, offrant un contraste de détection de 100 %. Au cours du projet, une étude de marché financée par la SATT SAYENS a permis la mise en œuvre d'un projet de maturation en lien avec le brevet déposé au début du projet. Ces deux actions ouvrent la voie à des négociations avec des industriels en vue de l'achat de licences du brevet.

Début du projet : 2019 | Durée : 56 mois |
Financement ANR : 500 000 €
anr.fr/Projet-ANR-18-CE42-0016

Coordination : Thierry Grosjean |
thierry.grosjean@univ-fcomte.fr
UMR 6174, Institut FEMTO-ST, CNRS

Appel à projets générique | 2019

OMICRON

Contrôle non destructif de
changements micromécaniques
locaux par champ proche micro-onde

Le projet Omicron repose sur le développement d'une méthodologie innovante de mesure basée sur la microscopie à sonde locale micro-onde pour déterminer les contraintes dans des composants métalliques de petites dimensions. La nouveauté et le potentiel de rupture de cette méthode résident dans le caractère tomographique 3D de la technique, la résolution nanométrique et la sensibilité.

En raison du volet « conception de la tête de mesure et traitement des données », ce projet s'inscrit dans une approche globale à l'usage des fabricants de composants. Il a abouti à la réalisation d'un démonstrateur de contrôle non destructif (CND) adapté aux besoins industriels en fonction des défauts, de la géométrie des composants et du type de matériaux.

Omicron a démontré son potentiel à caractériser l'état mécanique local (compression, traction, plasticité, élasticité, dureté) de petits composants à partir du signal d'amplitude micro-onde. La mesure du signal de phase micro-onde a montré son extrême sensibilité à la diffusion d'éléments chimiques légers (O, N) permettant de dissocier en une seule mesure état mécanique (amplitude) et constitution (phase). L'automatisation d'un appareil commercial AFM couplé à la mesure micro-onde a été réalisée permettant l'acquisition d'aire de plusieurs mm² avec un pas minimal de 3 µm sur une large gamme spectrale (0,3 GHz à 20 GHz) autorisant une analyse en profondeur jusqu'à 15 µm selon la nature des matériaux métalliques. Concernant les microcommutateurs, la simulation par éléments finis a été essentielle pour déterminer les grandeurs mesurées. Afin d'optimiser le modèle et de s'assurer des contraintes théoriques, la simulation complète du procédé de formage, incluant la maîtrise de l'ensemble des paramètres, a été réalisée. Elle a permis d'établir des corrélations correctes entre les géométries et les comportements sous charges.

Début du projet : 2019 | Durée : 48 mois |
Financement ANR : 454 025€
anr.fr/Projet-ANR-19-CE42-0007

Coordination : Éric Bourillot |
eric.bourillot@u-bourgogne.fr
UMR 6303, Laboratoire interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB), Université Bourgogne Franche-Comté

Appel à projets générique | 2019

PIEZOSENS

Capteurs Piezo-électriques à base de NanoFils

Le développement de capteurs de force bien contrôlés adaptés à un large éventail d'applications, des systèmes portables ou implantables aux microdispositifs électroniques, suscite aujourd'hui un intérêt croissant. En même temps, ces capteurs doivent être peu coûteux, autonomes et fonctionnels sur une large gamme d'échelles de longueur et dans diverses conditions environnementales, avec des sensibilités adaptatives et une consommation d'énergie minimale. Désormais l'utilisation de capteurs piézoélectriques permet la miniaturisation de systèmes électromécaniques légers et dépasse les dispositifs conventionnels dans ce type d'application. La fabrication dans les laboratoires de recherche permet de construire des dispositifs piézoélectriques minces, sensibles, robustes et flexibles.

Dans ce contexte, l'ambition du projet de PiezoSens est de développer des capteurs piézoélectriques efficaces basés sur des (nano-)fils (NFs) de GaN afin de permettre la cartographie de déplacements/déformations induits par une pression appliquée en surface.

Des architectures variées de capteurs sont développées avec différentes résolutions latérales et conformations, notamment rigides pour les applications à haute résolution spatiale, et flexibles avec un processus rapide qui s'adapte aux substrats de grande surface. Leur évaluation est réalisée avec deux générations de démonstrateurs complets équipée d'une électronique de mesure adaptée. Pour améliorer l'efficacité de la conversion piézoélectrique, des hétérostructures axiales InGaN/GaN sont utilisés en intégrant une insertion InGaN épaisse et riche en In dans le volume des fils GaN. PiezoSens propose une approche innovante pour une électronique de lecture générique à très faible consommation d'énergie pour les systèmes piézoélectriques.

Début du projet : 2020 | Durée : 54 mois |
Financement ANR : 424 365 €
anr.fr/Projet-ANR-19-CE42-0016

Coordination : Joel Eymery |
joel.eymery@cea.fr
 UMR 90001, IRIG-MEM-NRS, CEA-Grenoble

Appel à projets générique | 2018

THESEUS

Senseur thermique hybride à base de centres NV du diamant

Le diamant, composé d'un arrangement régulier d'atomes de carbone, peut incorporer des défauts atomiques dont le centre NV, formé d'un atome d'azote en substitution au voisinage d'une lacune. Ce défaut optiquement actif peut être associé un spin électronique sensible aux perturbations dans son environnement (champ magnétique ou électrique, température...). Son spectre de résonance magnétique peut aussi être lu optiquement. Ces propriétés permettent des capteurs atomiques, notamment des magnétomètres sans équivalent.

Le projet THESEUS ambitionne de généraliser ces approches en réalisant une nouvelle génération de sondes nanométriques de température avec des applications envisagées concernant la microélectronique, la science des matériaux ou la médecine telle que la thérapie photothermique du cancer.

La conductivité thermique très élevée du diamant facilite la thermalisation des sondes avec l'objet d'étude, mais il peut provoquer une dissipation thermique réductrice pour une mesure quantitative de l'échauffement local. Plusieurs architectures de capteurs ont été étudiées : nanoparticules, nanopointes, substrats et couches fines de diamant. Des simulations numériques et des mesures expérimentales ont démontré que des nanoparticules de diamant constituent la meilleure géométrie pour des mesures de température, les substrats de diamant ou couches minces induisant une dissipation excessive de la chaleur. L'architecture nanopointe, formée d'une nanopointe conique incorporant une dizaine de centres NV, soutenue par un cantilever formant une barrière thermique, s'avère aussi pertinente, sous réserve d'une optimisation de sa géométrie. Cette dernière configuration, optimisée pour la mesure thermique, présente en effet des sensibilités mesurées de l'ordre du K/Hz^{1/2} comme prédit par les simulations. En adoptant une architecture hybride associant un nanodiamant incorporant un centre NV unique et une nanoparticule ferromagnétique en CoNi, une sensibilité record à la température a été obtenue, atteignant de 76 µK/Hz^{1/2} à température ambiante.

Début du projet : 2018 | Durée : 58 mois |
Financement ANR : 281 118 €
anr.fr/Projet-ANR-18-CE42-0014

Coordination : Gergely Csilla |
csilla.gergely@umontpellier.fr
 UMR 5221, Laboratoire Charles Coulomb, CNRS

Annexe

**LISTE DES PROJETS FINANCÉS
PAR L'AXE « CAPTEURS,
IMAGEURS ET
INSTRUMENTATION »
DE L'APPEL À PROJETS
GÉNÉRIQUE**

Thématique Imager, détecter le vivant

Acronyme	Titre	Édition	Aide allouée
5D-SURE	Microscopie de fluorescence super-résolue 5D pour la biologie	2021	687 387 €
AmpliSens	Biocapteurs de métabolites amplifiés par des nanoantennes fluorescentes	2021	573 686 €
aQuaLead	Système autonome pour la détection en temps réel de traces de plomb dans l'eau potable	2022	351 711 €
AutoBioTip	Automatisation des mesures mécanobiologiques par AFM, et de leur analyse par Apprentissage automatique	2020	326 497 €
BIOSENS-PATH	Détection de biomarqueurs dans l'air expiré pour le suivi de pathologies non invasives	2022	455 964 €
CAPTAIN	Imagerie photoacoustique comprimée de l'activité neuronale	2023	259 871 €
CHIRA-SENSEO	Détection énantiométrique via des transistors électrochimiques organiques	2023	669 922 €
COCOHRICO	nanoscopie Raman Cohérente computationnelle	2021	259 724 €
COUUPPLES	Couplage ultrafort et ultrarapide de modes plasmoniques et photoniques pour des capteurs hautement efficaces	2023	498 289 €
C-STET-4-E-Cells	Développement de la cryo-tomographie électronique à transmission en balayage faible dose en utilisant des images parcimonieuses, pour étudier les cellules eucaryotes entières à l'échelle du nanomètre	2021	25 603 €
CYTOMEMS	Instrumentation intelligente de cytométrie biophysique en flux pour une approche d'apprentissage statistique	2021	545 609 €
DEEP-HEPATOSCREEN	Plateforme de criblage haut débit pour l'imagerie quantitative assistée par apprentissage profond de modèles de cultures cellulaires 3D d'hépatotoxicité	2022	634 883 €
ELIPOX	Electrochimie des nano-impacts de liposomes redox pour la détection de toxines bactériennes	2021	254 272 €
ELISE	Nano-imagerie électrochimiluminescente d'objets individuels	2021	536 308 €
eSPRI	Un dispositif SPRI portable de haute résolution spatiale pour la détection d'agents pathogènes	2022	479 544 €
ForceNBI	Capteur de force à base de nanocristaux semi-conducteurs pour l'imagerie biologique super-résolue	2023	596 792 €
HaBIIm	Imagerie corrélative par Génération du Second Harmonique et microscopie Brillouin pour sonder les propriétés mécaniques multi-échelles des cordes vocales	2023	349 320 €
HERMES	Microscopie et spectroscopie AFM à ultra haute vitesse et haute résolution de systèmes biologiques	2021	694 754 €
HiRes-PFM	Sondes nano-fabriquées pour la prochaine generation de la Microscopie à Force Photonique	2020	375 974 €
Hi-Trac	Microscopie de forces de traction à haute résolution	2019	302 753 €
LIFIMMOrg	Microscopie plénoptique pour l'imagerie volumétrique et long-terme d'organoides	2022	267 358 €
LightRIM	LightRIM : Microscopie superresolutive par éclairage aléatoire bas coût	2022	447 015 €
Mapics	Plateforme analytique microfluidique pour l'étude des sécrétions de cellules individuelles	2023	614 538 €
MICROCOCCO	Manipulation microfluidique de microalgues coccolithophores pour les études de biominéralisation in vivo : impact des conditions d'acidification des océans sur la formation de carbonate de calcium	2021	184 750 €
MOONSTONE	Détection de bactéries par spectrométrie de masse avec ionisation par désorption laser sur des surfaces fonctionnalisées et couplées à l'électrospray. Vers une détection précoce de la septicémie	2022	407 392 €
Nanowhispers	Biodétection à l'aide de nanocristaux lasant en microcavité à modes de galerie	2021	467 423 €
NIS	e-Substrats pour l'imagerie moléculaire dans les cellules	2021	400 149 €
OFFER	Intégration du fastFLIM et du partening de champs évanescents pour l'optogénétique	2020	381 096 €
PIRaNa	Imagerie quantitative de la production de radicaux hydroxyles à proximité de nano-objets individuels: une méthodologie opto-electrochimique	2020	265 347 €
SeqSynchro	Séquençage ultra-haut débit par synthèse synchronisée	2018	414 288 €
SHEARPROBE	Tomographie de Cisaillement des Flux Dynaiques à la Surface des Cellules à Base de Nanosondes	2023	403 765 €
TemporalSmartScan	Un microscope adaptatif spatio-temporel pour l'imagerie des tissus biologiques	2022	404 918 €
THTTM	Microscopie Tomographique Thêta à Hétérodynage Temporel	2019	260 712 €
TIMELoc	Microscopie optique super-résolue par codage temporel	2022	473 017 €
TRAFALDA	Traçabilité des faibles forces et caractérisation métrologique d'un dispositif biomédical innovant pour la PMA	2023	517 901 €
Tubular Bell	Cristal phononique tubulaire pour l'analyse (bio)chimique en phase liquide	2018	182 304 €
VISION	Excitation et imagerie super-résolution volumétrique confinée à basse température : étude de l'architecture du chromosome durant l'expression des gènes	2019	348 300 €

Laboratoire	Coordination	Fiche en ligne
Abbelight / R&D	Nicolas Bourg	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0015
Laboratoire de Bioimagerie et Pathologies (UMR 7021)	Andrey Klymchenko	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0019
Laboratoire de Chimie Physique et Microbiologie pour l'Environnement	Grégoire Herzog	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0028
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (CNRS)	Étienne Dague	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0017
Université Bourgogne Franche-Comté	Virginie Blondeau-Patissier	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0016
Institut Fresnel - Marseille	Thomas Chaigne	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0003
Institut des Sciences Moléculaires	Alexander Kuhn	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0004
Laboratoire Kastler Brossel	Hilton Barbosa de Aguiar	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0013
Laboratoire Lumière-Matière aux Interfaces	Bruno Palpant	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0005
Institut Curie	Sylvain Trepout	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0001
Laboratory for Integrated Micro Mechatronics Systems	Dominique Collard	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0011
CNRS	Jean-Baptiste Sibarita	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0017
Chimie et Interdisciplinarité : Synthèse, Analyse, Modélisation	Estelle Lebegue	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0007
Systèmes Moléculaires et Nanomatériaux pour l'Énergie et la Santé	Neso Sojic	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0008
Lumière, Nanomatériaux, Nanotechnologies (CNRS EMR7004)	Yanxia Hou-Broutin	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0008
Laboratoire Photonique, Numérique, Nanosciences	Rodolphe Jaffiol	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0009
Centre de Biochimie Structurale	Stéphane Bancelin	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0013
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes	Bernard Legrand	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0031
Centre de Biochimie Structurale	Francesco Pedaci	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0005
Laboratoire Interdisciplinaire de Physique	Delphine Débarre	https://anr.fr/projet-ANR-19-CE42-0010
Institut Optique Graduate School	Amaury Badon	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0019
Centre de Biologie Intégrative	Thomas Mangeat	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0026
Systèmes Moléculaires Et Nano Matériaux Pour L'Énergie Et La Santé	Aurélié Bouchet Spinelli	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0018
Institut de Biosciences et Biotechnologies d'Aix-Marseille (UMR 7265)	Daniel Chevrier	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0022
Institut Lumière Matière	Rodolphe Antoine	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0031
Laboratoire de Physique et d'Étude des Matériaux	Thomas Pons	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0029
Institut Fresnel Marseille	Aude Lereu	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0021
Institut pour l'Avancée des Biosciences	Olivier Destaing	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0018
Interfaces, Traitements, Organisation et Dynamique des Systèmes	Jean-Marc Noël	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0001
Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille	Franck Thibaudau	https://anr.fr/projet-ANR-18-CE42-0013
Laboratoire de Physique de la Matière Condensée	Jong-Wook Kim	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0007
Institut Fresnel Marseille	Loic Le Goff	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0010
Institut de Recherche en Informatique, Mathématiques, Automatique, Signal (IRIMAS - EA 7499)	Nicolas Verrier	https://anr.fr/projet-ANR-19-CE42-0004
CNRS	Sandrine Lévêque-Fort	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0023
Institut Franche-Comté Électronique, Mécanique, Thermique et Optique - Sciences et Technologies	Emmanuel Piat	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0022
Institut des Nanosciences de Paris	Bernard Bonello	https://anr.fr/projet-ANR-18-CE92-0023
Institut Curie - Secteur de Recherche	Bassam Hajj	https://anr.fr/projet-ANR-19-CE42-0003

Thématique Microscopies, imageries spectro

Acronyme	Titre	Édition
B-SNAM	Microscopie acoustique de champ proche avec une bulle	2023
COCOA	Lidar cohérent à compression d'impulsions analogique tout-optique	2021
ELECTROCOMB	Spectroscopie à double peignes de fréquences générés électro-optiquement pour des applications dans le moyen infrarouge	2021
FARCO	Triples peignes de fréquences ajustables tout fibré pour la spectroscopie et l'imagerie Raman cohérente	2022
HULOT	Tomographie Acousto-Optique par Holographie Laser	2021
HYPSTER	Holographie et imagerie de phase hYperspectrale par ondes TERahertz	2022
MaxPhase	Détection de phase multiplexée pour la métrologie et l'imagerie	2020
MetaMorph	Génération morphogénétique de composants électromagnétiques	2021
MUFFIN	Étude des invariants et corrélations dans les fibres optiques multimodes pour l'imagerie	2023
NanoSpeCD	Spectropolarimètre à base de nanophotonique pour la détection ultra-sensible de dichroïsme circulaire	2023
NEWCOMER	Caractérisation de matériaux complexes par ondes élastiques guidées engendrées par ultrasons laser	2023
PISA	Analyseur de signaux intégré sur sonde coplanaire pour composants millimétriques et THz	2023
PROFIT	Technologie d'optique planaire reconfigurable pour l'imagerie.	2021
STEPSON	Spectromètre TeraHertz en domaine temporel pour la détermination de propriétés optiques de micro et nano-particules en suspension dans l'air en environnement contrôlé	2020
TARANIS	Acquisitions et reconstructions tomographiques pour les systèmes d'imagerie nanoscopique avancés	2022
TeraCellATR	Capteur térahertz ATR pour l'étude en temps réel de la perméabilisation des membranes cellulaires	2021
THz-MUFINS	Dynamiques THz dans les nanostructures et super-réseaux de matériaux multiferroïques	2021
UV-ATMOCOS	Détection à distance des gaz traces ATMosphériques absorbants dans l'UV en utilisant une Spectroscopie femtoseconde Cohérente, large bande et résolue spectralement.	2022
VERDICT	Analyseur de fronts d'onde vectoriels pour la caractérisation des composants de l'optique diffractive	2022
WASPE	Cellule plasma à guide d'onde pour la spectroscopie térahertz	2022

Laboratoire	Coordination	Fiche en ligne
Laboratoire Interdisciplinaire De Physique	Emmanuel Bossy	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0016
Institut Fonctions Optiques Pour Les Technologies De L'Information	Hugues Chatellus	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0025
Laboratoire Interdisciplinaire Carnot De Bourgogne - Umr 6303	Guy Millot	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0026
Centre National De La Recherche Scientifique - Delegation Regionale Hauts-De-France	Arnaud Mussot	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0003
Institut Langevin Ondes Et Images	Francois Ramaz	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0014
Universite De Bordeaux	Patrick Mounaix	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0005
Imagine Optic	Fabrice Harms	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0006
Xlim	Thomas Fromenteze	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0005
Institut Langevin Ondes Et Images	Sébastien Popoff	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0010
Institut Des Nanosciences De Paris	Bruno Gallas	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0019
Institut Langevin Ondes Et Images	Sylvain Mezil	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0020
Umr 8520 - Iemn - Institut D'Electronique, De Microelectronique Et De Nanotechnologie	Emilien Peytavit	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0025
Institut De La Vision	Pascal Berto	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0023
Institut D'Electronique, De Microelectronique Et De Nanotechnologie	Sophie Barois Née Eliet	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0002
Universite Aix-Marseille	Guillaume Maire	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0004
Laboratoire D'Optique Et Biosciences	Guilhem Gallot	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0018
Institut Des Molecules Et Materiaux Du Mans	Pascal Ruello	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0030
Universite Claude Bernard Lyon 1	Sandrine Galtier	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0002
Centre De Recherche Sur L'Heteroepitaxie Et Ses Applications	Samira Khadir	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0021
Umr 8520 - Iemn - Institut D'Electronique, De Microelectronique Et De Nanotechnologie	Jean-Francois Lampin	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0024

Thématique Capteurs et détecteurs

Acronyme	Titre	Édition	Aide allouée
ADVANSPEC	Nanosource avancée et accordable pour la spectroscopie locale	2021	433 416 €
AERONEMS	Nébulisation acoustique et spectrométrie de masse à nano-résonateurs opto-mécaniques pour l'analyse rapide de particules virales.	2021	405 281 €
AISLE	Imagerie avancée pour les éléments légers stratégiques	2023	358 325 €
BOLD-PET	Détecteur Bismuth-Organique Mixte, Optique Tcherenkov et Chambre Ionisation, pour la Tomographie par Emission de Positrons	2018	396 020 €
CAMICAZE	CAVité Multi-diéleCtrique Active à mode de Bloch pour capteur de gaZ optique	2023	568 273 €
CASSINI	Amélioration de la stabilité des horloges et capteurs à base de NEMS pour l'instrumentation	2022	192 100 €
CATANAS	Conception de dispositifs d'instrumentation pour le contrôle d'écoulements aérodynamiques : micro-actionneurs à base de nanostructures thermo-acoustiques associés à des micro-capteurs thermiques	2022	291 054 €
CIFOM	Capteurs In situ ultrasensibles à Fibre Optique Multicoeurs	2023	414 208 €
DACLOS	Corrélation des ondes acoustiques diffuses dans des microstructures de type couche-sur-substrat	2021	172 400 €
DETOX	Développement d'outils numériques et expérimentaux pour optimiser des réseaux de capteurs piezos organiques pour le SHM de structures complexes	2023	535 635 €
DIAMMONI	Instrumentation DIAMant pour le MONItorage de faisceaux pulsés	2020	285 772 €
DoTPIX	Développement d'une Technologie pour un détecteur de particules à pixels	2023	501 154 €
DyXPLAY	Imagerie rayons X dynamique en contraste de phase pour l'analyse de la foudre	2023	297 069 €
EASCVsens	Voltammétrie par échantillonnage de courant sur réseau d'électrodes pour la détection des éléments-traces métalliques dans les eaux	2018	545 766 €
EL-TORO	Tomographie électrique 2D et 3D : diagnostic de la corrosion des matériaux cimentaires renforcés	2021	556 163 €
'-ENCORE-	Evaluations Non-destructives des COntraintes RESiduelles	2022	616 335 €
e-WARNINGS	Détection précoce de la rupture par fatigue ou intermittente via les multiplets acoustiques validés en champ complet	2019	603 042 €
FIRST	Topographie de surface reconstruite par mesure d'intensité diffuse en champ lointain	2019	454 680 €
FUNSENS	Sondes à fibres photoniques nano-fonctionnalisées pour la prochaine génération de capteurs biochimiques	2021	239 758 €
HYPOSEL	Comprendre les interactions ioniques spécifiques avec des Nanotransistors pour le contrôle de l'hypnatremie	2023	519 830 €
LiveMetaOptics	STRUCTURES DYNAMIQUES HYBRIDES POUR CONTRÔLE DE FORME DE SURFACES DE QUALITÉ OPTIQUE	2018	406 103 €
MAROT	Magnétomètre faible bruit à jonction tunnel	2022	457 523 €
MicroVISCOTOR	Mesure in situ des micro viscosités dans des systèmes complexes en utilisant des rotors moléculaires.	2018	394 634 €
MIGNON	Mesure des propriétés physiques des Gaz à l'aide de MEMS résoNnants pour la détectiON chimique en milieu hostile	2022	566 696 €
MiRyAD	Dispositifs à atomes de Rydberg miniatures	2023	278 075 €
PARS	Ouverture programmable pour la détection résistive de nanoparticules	2022	417 028 €
PICSONDE	Circuit Intégré Photonique couplé à un Système sur Puce pour un capteur de déplacement sub-picométrique	2020	414 799 €
POETESSE	Détection photothermale dans les absorbeurs solaires	2022	290 610 €
PuCK	Cryo-refrigérateurs de type tube à gaz pulsé intégrant une micropompe Knudsen	2022	315 108 €
RAYOVOX	Caractérisation du rayonnement de la voix humaine : du conduit vocal au champ lointain	2021	501 182 €
SExHy	Capteurs Extrêmement Sélectifs à l'Hydrogène	2023	577 325 €
SPACESENSE	Capteurs imprimés autonomes pour applications spatiale	2022	549 546 €
TESLA	Vers un capteur magnétique ultrasensible basé sur les ondes de Lamb pour des applications biomédicales	2023	209 408 €
TPX4	Détecteurs à pixel rapides et efficace résolus en temps et en position pour la spectroscopie électronique 4D	2023	711 322 €
WISSTITWIN	Devloppement de technologies miniaturisées de capteurs SAW multiparamètres pour l'implémentation du jumeau numérique des machines électriques.	2020	607 362 €

Laboratoire	Coordination	Fiche en ligne
Utt-Lumière, Nanomatériaux, Nanotechnologies - CNRS Erl7004	Pierre-Michel Adam	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0006
Institut de Recherche Interdisciplinaire de Grenoble	Christophe Masselon	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0028
Georessources	Cécile Fabre	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0023
Institut de Recherche sur les Lois Fondamentales de l'Univers	Viatcheslav Sharyy	https://anr.fr/projet-ANR-18-CE92-0012
Institut Fresnel Marseille	Claude Amra	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0017
Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies	Alexis Brenes	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0007
Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie	Cécile Ghouila-Houri	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0018
Institut Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies	Thierry Grosjean	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0021
Université Polytechnique Hauts-de-France - Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie	Lynda Chehami	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0002
Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux	Samuel Rodriguez	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0026
Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie	Marie-Laure Gallin-Martel	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0004
Département d'Électronique, des Détecteurs et d'Informatique pour la Physique	Nicolas Fourches	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0014
Département Physique Instrumentation Environnement Espace	Amelie Jarnac	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0002
Institut des Sciences Chimiques de Rennes	Florence Geneste	https://anr.fr/projet-ANR-18-CE42-0011
Bureau de Recherche Géologique et Minière	Stéphanie Bertelu	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0016
Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives	Alain Lhemery	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0029
Matériaux : Ingénierie et Science	Stéphanie Deschanel	https://anr.fr/projet-ANR-19-CE42-0012
Institut Fresnel Marseille	Myriam Zerrad	https://anr.fr/projet-ANR-19-CE42-0009
Xlim	Georges Humbert	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0027
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes	Nicolas Clement	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0024
Centre de Recherche Astrophysique de Lyon	Gil Moretto	https://anr.fr/projet-ANR-18-CE42-0007
CNRS	Guillaume Jannet	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0020
Laboratoire du Futur	Yaocihuatl Medina-Gonzalez	https://anr.fr/projet-ANR-18-CE42-0010
Université de Bordeaux / Laboratoire d'Intégration du Matériau au Système	Isabelle Dufour	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0012
UMR 8520 - IEMN - Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie	Vincent Maurice	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0012
Laboratoire Roberval. Unité de Recherche en Mécanique Acoustique et Matériaux	Frédéric Lamarque	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE92-0035
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS	Olivier Bernal	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0010
Institut Photovoltaïque d'Île-de-France	Géraud Delport	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0027
Institut Clément Ader	Lucien Baldas	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE92-0017
Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique	Fabrice Silva	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0017
Institut Européen des Membranes	Martin Drobek	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0029
Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces	Costel Sorin Cojocar	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0030
Institut Jean Lamour	Cécile Floer	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0001
Laboratoire de Physique des Solides	Mathieu Kociak	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0008
Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie	Abdelkrim Talbi	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0009

Thématique THz, peigne de fréquence, ondes

Acronyme	Titre	Édition	Aide allouée
2DTherm	Matériaux 2D pour la mesure thermique par technique Raman sur composants électroniques de puissance	2023	586 991 €
3D_SPED_APT	Couplage de la nano diffraction électronique et de la sonde atomique tomographique pour la caractérisation tridimensionnelle de nanomatériaux polycristallins	2019	276 767 €
ALXM	Microtomographie à rayons X de laboratoire avancée	2018	618 386 €
ARTEMIA	Intelligence Artificielle appliquée à la microscopie électronique in situ à très haute résolution	2021	468 440 €
AtomiChem	TERS à l'échelle atomique: plateforme Pico-Raman pour des études chimiques à résolution ultime	2022	469 822 €
DEUS-Nano	Détection de la physique des matériaux 2D avec une plateforme universelle de nano-opto-electro-mécanique	2019	225 698 €
Dip-NMR	Spectroscopie à micro-sondes RMN immergé pour l'analyse de réactions catalytiques	2019	508 333 €
DynaMoBat	Étude Dynamique de l'Evolution Morphologique 3D des Batteries Tout-Solide Li-ion pendant leur Cyclage et leur Fabrication	2022	641 309 €
EHIS	Imagerie d'ondes de spins par holographie électronique	2021	484 904 €
EXPERTISE	Station expérimentale pour la spectroscopie de photoélectrons résolue en temps et en angle	2021	266 200 €
FIBback	Faisceau d'ions focalisés par contre-réaction d'électrons corrélés	2021	406 473 €
FLEX-UV	Source à fibres optiques émettant dans l'ultraviolet extrême	2020	584 916 €
GigaSpin	Excitation resonante GHz de magnons et phonons par un peigne de fréquence optique accordable	2022	581 602 €
GINET2_0	Génération future de microscopie à effet tunnel radiofréquence	2020	322 920 €
HANIBAL	Gestion de la chaleur dans la limite balistique à l'échelle nanométrique	2020	423 362 €
Hi-KEAP	Analyse 3D analytique par Sonde Atomique Tomographique Haute Energie : Vers la discrimination en énergie cinétique et discrimination moléculaire des fragments analysés	2021	450 350 €
HOLO-CONTROL	Capacités étendues de contrôle de la vision machine grâce à l'holographie numérique et aux réseaux neuronaux artificiels	2021	360 640 €
HYPSTER	Microscope champ proche hyperspectral dans la gamme TéraHertz étendue	2020	605 338 €
ImagingQM	Sonder à une échelle atomique les ordres des matériaux quantiques corrélés	2023	313 216 €
IMAGIQUE	Imagerie mécanique et thermique des nanofils à l'échelle nanométrique par microscopie électronique à balayage	2022	475 009 €
IMPULSE	Cartographie in situ des transitions isolant-métal par spectromicroscopie électronique de ultra-haute résolution	2019	271 404 €
INDIANA	Imaginer la dynamique des porteurs à la nanoéchelle grâce aux interactions lumière- et électron-matière	2021	241 335 €
INFERNO	Caractérisation in-situ, (photo)transport ultra rapide et électroluminescence à l'échelle nanométrique	2022	542 972 €
Liquid3DSTEM	Microscopie électronique en 3D et en phase liquide pour la science des matériaux et la biologie	2020	254 187 €
MEDYNA	MEtologie de la DYNamique d'Aimantation et de la chiralité dans les films minces	2020	473 456 €
METRICS	Flow Cell In Situ Multi-Sondes Pour les Fluides Supercritiques	2022	190 512 €
MILF	Imagerie Magnétique à basses dimensions et hautes fréquences	2018	192 348 €
MULTIPROBE	Caractérisation « operando », multi-échelle et multi-technique, des catalyseurs bimétalliques	2020	751 554 €
NACELL	Développement d'une cellule à membrane pour la caractérisation NAP-XPS in situ	2022	534 259 €
OPTYMAL	Spectroscopies operando et in situ pour les matériaux de l'énergie	2020	367 454 €
POLARYS	Cartographie de la polarisation par holographie électronique	2023	549 811 €
PuMMAVi	Pomper, Mesurer et Modéliser les Vibrations Atomiques dans le Microscope Electronique	2023	222 609 €
SpinE	Préparation et mesure d'états de spin-valley à l'échelle nanométrique à l'aide d'électrons rapides et de photons	2020	262 418 €
STORE	Détecteur spectral par rayonnement thermique champ proche pour l'analyse et la caractérisation de nanomatériaux	2021	336 840 €
STORM	Détection magnétique à Spin Orbit Torque	2022	458 894 €
TempoScopy	Cartographie de Température et de Conductivité Thermique de Composants de Puissance par Spectro-nanoScopie	2022	386 594 €
TI-BISTRO	Spectroscopie Brillouin exaltée par effet de pointe	2022	299 800 €
ULTEM	Développement d'un microscope électronique en transmission ultrarapide cohérent de seconde génération	2023	554 693 €
UltraSNOM	Détection ultrasensible en champ proche : empreinte moléculaire renforcée par des polaritons	2023	178 937 €
WATEM	Microscopie Electronique en Transmission d'Objets Hydratés et de Liquide sans Membranes	2020	412 803 €
XMUM	UltraMicroscopie Magnétique par rayons X	2019	546 858 €

Laboratoire	Coordination	Fiche en ligne
Thales	Dominique Carisetti	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0015
Sciences et Ingénierie des Matériaux et des Procédés	Edgar Rauch	https://anr.fr/projet-ANR-19-CE42-0017
Sols, Solides, Structures et Risques	Sabine Rolland Du Roscoat	https://anr.fr/projet-ANR-18-CE42-0005
Laboratoire des Matériaux et Phénomènes Quantiques	Christian Ricolleau	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0012
CNRS	Fabrice Scheurer	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0006
Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies	Julien Chaste	https://anr.fr/projet-ANR-19-CE42-0005
Laboratoire des Sciences de l'Ingénierie, de l'Informatique et de l'Imagerie (UMR 7357)	Morgan Madec	https://anr.fr/projet-ANR-19-CE42-0015
Laboratoire Réactivité et Chimie des Solides	Arnaud Demortiere	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0025
Centre d'Élaboration de Matériaux et d'Études Structurales	Nicolas Biziere	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0003
Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg (UMR 7504)	Nicolas Bergeard	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0004
Laboratoire Aimé Cotton	Yan Picard	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0010
Xlim	Sébastien Février	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0013
Institut d'Optique Graduate School	Eric Cormier	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0001
Institut des Nanosciences de Paris	Marie Hervé	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0011
Institut Néel	Bourgeois Olivier	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0019
Groupe de Physique des Matériaux	François Vurpilot	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0024
Institut Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies	Maxime Jacquot	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0009
Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie	Marc Faucher	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0016
Laboratoire de Physique des Solides	Alexandre Gloter	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0027
Institut Néel	Moira Hocevar	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0022
Laboratoire de Physique des Solides	Laura Bocher	https://anr.fr/projet-ANR-19-CE42-0001
Institut Néel	Gwénolé Jacopin	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0020
Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie	Maxime Berthe	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0015
Matériaux : Ingénierie et Science	Karine Masenelli-Varlot	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE92-0014
Synchrotron SOLEIL	Nicolas Jaouen	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0012
CNRS	Matthew Suchomel	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0009
Centre d'Élaboration de Matériaux et d'Études Structurales	Aurélien Masseboeuf	https://anr.fr/projet-ANR-18-CE42-0002
Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg (UMR 7504)	Ovidiu Ersen	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0007
CNRS	Luis Cardenas	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0011
Service de Physique de l'État Condensé	Helene Magnan	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0015
Centre d'Élaboration de Matériaux et d'Études Structurales	Christophe Gatel	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0011
Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie	Guillaume Radtke	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0028
Laboratoire de Physique des Solides	Luiz Tizei	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0020
Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon	Olivier Merchiers	https://anr.fr/projet-ANR-21-CE42-0032
Service de Physique de l'État Condensé	Myriam Pannetier Lecoer	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0013
Université de Technologie de Troyes - Institut Charles Delaunay	Aurélien Bruyant	https://anr.fr/projet-ANR-19-CE42-0008
Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux	Eloi Haltz	https://anr.fr/projet-ANR-22-CE42-0014
Centre d'Élaboration de Matériaux et d'Études Structurales	Arnaud Arbouet	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0006
Synchrotron SOLEIL	Ferenc Borondics	https://anr.fr/projet-ANR-23-CE42-0030
Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon	Thierry Epicier	https://anr.fr/projet-ANR-20-CE42-0008
Sciences et Ingénierie des Matériaux et des Procédés	Guillaume Beutier	https://anr.fr/projet-ANR-19-CE42-0013

anr®

Agence nationale de la recherche
86 rue Regnault – 75013 Paris
www.anr.fr
www.appelsprojetsrecherche.fr

Suivre notre actualité sur les réseaux sociaux :  **ANR_agencerecherche**  **ANR**  **ANR**  **@agencerecherche**
S'inscrire à la newsletter : **anr.fr/sr/newsletter**