

# PROGRAMME RECHERCHE À RISQUE



## Projets

### 6 **ALEAS**

Déjouer les événements extrêmes dans les écoulements turbulents

### 8 **CalcADN**

Inventer le premier ordinateur en ADN qui réalise des calculs de grande taille

### 10 **CatFoam**

Créer des fluides structurés aux enzymes actifs pour dégrader les biofilms bactériens ou les microplastiques

### 12 **D-Light**

Transformer les fibres optiques en réseaux denses de capteurs pour le suivi environnemental des milieux terrestres et marins

### 14 **EcoPalladium**

Prévenir la pénurie annoncée de médicaments grâce à l'écocatalyse au palladium pour une industrie pharmaceutique durable

### 16 **ERL4ALL**

Développer un accélérateur de particules à récupération d'énergie, à l'efficacité énergétique sans précédent

### 18 **HéLiCéo**

Comprendre la diversité des langues et leur transmission en contexte plurilingue

### 20 **MaQuI**

Modéliser et simuler certains systèmes quantiques par de nouvelles approches mathématiques

### 22 **PheroInnov**

Innover en agroécologie et dans la lutte anti-terroriste grâce à la détection bio-inspirée d'odeurs par les insectes

### 24 **Polaritonic**

Contrôler la synthèse de molécules et les propriétés des matériaux

### 26 **ProteoVir**

Lutter contre les neuroinfections en étudiant les protéines de chaque cellule individuellement dans leur environnement

### 28 **TES4DM**

Découvrir la matière noire légère

**Directeur de la publication**  
Antoine Petit

**Rédaction**  
Laure Thiébaud

**Conception graphique**  
David Faure

**Date de publication**  
Octobre 2024

Crédits couverture : © Tom Merton/Getty

Le CNRS a accueilli avec une grande satisfaction la création d'un nouveau programme national de France 2030 visant à accélérer la recherche à risque.

Dans ce cadre, nous avons fait le choix de retenir des projets ambitieux en pariant sur des projets en rupture visant à produire des connaissances ou des savoir-faire véritablement novateurs et utiles pour la société. Nous avons privilégié des projets risqués, portés par un nombre limité - typiquement d'un à trois - de co-porteurs aux compétences complémentaires et non finançables facilement ou rapidement par les canaux habituels. Cette prise de risque nous en avons l'habitude, nous la revendiquons même. Elle nous permet, en particulier, d'obtenir d'excellents résultats à l'European Research Council (ERC) et d'être la première institution européenne bénéficiaire de ces financements depuis leur création.

**« Avec une approche novatrice, le programme Recherche à risque s'inscrit dans les actions du CNRS pour favoriser l'audace scientifique et permettre des avancées majeures dans tous les champs de la connaissance. »**

Alain Schuhl, Directeur général délégué à la science du CNRS

Cette brochure présente les 12 projets retenus par le CNRS en 2024, chacun doté d'un budget de 2 à 3 M€. Ils illustrent le très large spectre des thématiques couvertes par le CNRS et la richesse résultant de l'interaction de ces thématiques. Ces projets présentent également un fort impact potentiel en cas de succès, succès qui ne peut être garanti par définition même de la recherche à risque. Ils montrent la variété des impacts potentiels de ces projets, qui peuvent être industriel, social ou scientifique et qui traduisent une parfaite mise en œuvre de l'ambition du CNRS : conduire une recherche fondamentale au service de la société. ■

Antoine Petit, Président-directeur général du CNRS



# Déjouer les événements extrêmes dans les écoulements turbulents



**IMPACT**

La turbulence est un état de la dynamique des fluides caractérisé par la présence de mouvements tourbillonnaires à différentes échelles spatio-temporelles. La turbulence est partout autour de nous : dans l'atmosphère, dans l'océan... Ces écoulements turbulents sont le siège de changements soudains et imprévisibles. Ces aléas naturels, amplifiés par le changement climatique, peuvent avoir un impact dévastateur sur nos infrastructures : tempêtes inattendues, vagues soudaines submergeant les bateaux ou les installations côtières, rafales violentes déstabilisant les éoliennes sont autant d'exemples d'événements extrêmes, qui semblent imprévisibles. Pourtant, des signaux précurseurs se cachent dans la complexité de la turbulence des écoulements sous-jacents dans les instants qui les précèdent. Nos capacités d'adaptation au changement climatique dépendront de notre capacité à interpréter de tels signaux. Inspirés par la capacité énigmatique des oiseaux à anticiper les tempêtes majeures, l'objectif du projet ALEAS vise à apprendre à détecter des signaux faibles potentiellement annonciateurs de catastrophes à venir dans des environnements turbulents.

## Porteurs

Béregère Dubrulle  
Guillaume Balarac  
Mickaël Bourgoïn



**VERROUS  
À LEVER**

La turbulence favorise la formation d'événements extrêmes qui demeurent une énigme : les modèles théoriques simplifiés se montrent inopérants pour les prévoir, leur simulation numérique nécessite de mobiliser des puissances de calculs considérables, la rareté des événements rend difficile leur observation expérimentale systématique. Le projet ALEAS vise à lever ces verrous en réinventant les méthodes de mesure, de simulation et de modélisation. L'objectif consiste à générer plus efficacement et de manière plus sobre une base de données d'événements extrêmes à partir de laquelle il sera possible d'implémenter une stratégie de détection de leurs faibles signaux précurseurs.

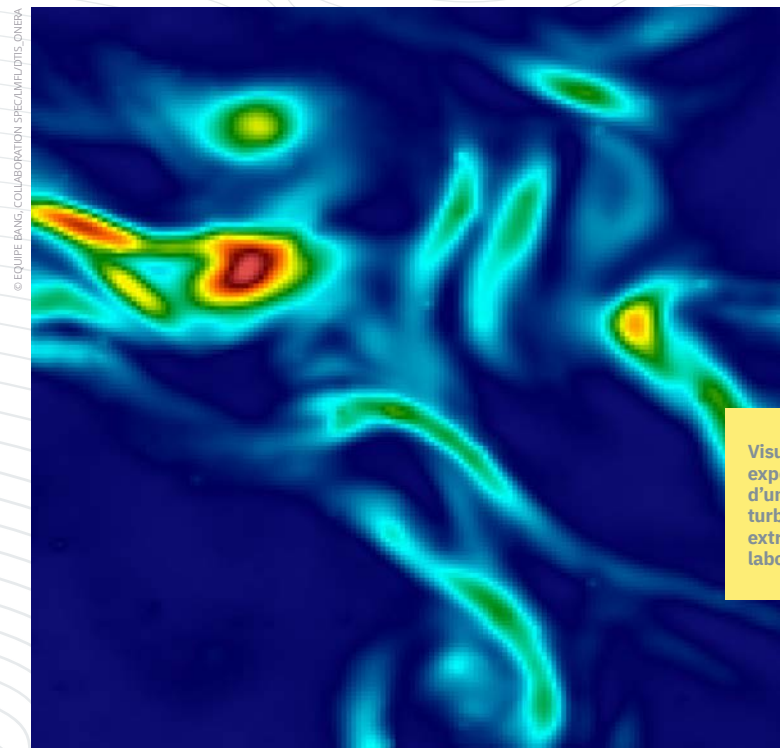
**300  
milliards  
de \$/an**

**pour le coût  
des événements  
extrêmes au  
niveau mondial**



**RISQUES**

L'intelligence artificielle sera exploitée pour piloter les simulations numériques vers des événements extrêmes. La stratégie biomimétique innovante considérera les différences d'état plutôt que les états eux-mêmes. Cette prise en compte de l'interaction avec l'environnement pour détecter des précurseurs de bifurcation représente une rupture. ■



Visualisation expérimentale d'un événement turbulent extrême en laboratoire



**POTENTIEL  
D'INNOVATION**

Le projet ALEAS permettra le développement de nouvelles méthodes de mesure des fluides moins coûteuses et plus sobres par une imagerie à très haute résolution, basées sur la technologie événementielle où les changements sont détectés à l'échelle du pixel, sans nécessité d'acquérir les images entières. Dans la continuité, ce projet pourra favoriser l'avènement de nouvelles IA neuro-morphologiques. Ces IA fonctionneront à partir des différences ou des liens entre les éléments de la base de données, créant ainsi une nouvelle forme d'IA plus proche du fonctionnement neuronal.

# Inventer le premier ordinateur en ADN qui réalise des calculs de grande taille



IMPACT

L'objectif principal de CalcADN est de créer un ordinateur capable de manipuler des données directement en ADN. En effet, l'enregistrement et le stockage de données dans l'ADN synthétique constituent déjà une réalité, et constituent une solution prometteuse pour conserver des informations de manière compacte et durable tout en étant respectueux de l'environnement. Mais pour que son application ne se limite pas à l'archivage, il est nécessaire de pouvoir interagir avec ces données, et d'exprimer les programmes, c'est-à-dire les actions que l'on souhaite voir réaliser, directement en ADN. C'est tout le but du projet CalcADN en développant le premier ordinateur ADN qui manipule et analyse ces données directement sous leur forme ADN. En combinant les requêtes et les données dans une même solution et en parallélisant les processus avec la boîte à outils enzymatiques, CalcADN vise à rendre le calcul moléculaire beaucoup plus efficace, dépassant ainsi les limitations actuelles qui ne permettent de traiter que de très petites quantités d'information. Ce projet ouvrira ainsi de nouvelles perspectives dans l'analyse de données et établira l'ADN comme un support de stockage et de calcul d'avenir.

Diviser par  
**1 000**  
la consommation  
énergétique  
par rapport à un  
ordinateur classique



VERROUS  
À LEVER

Le premier verrou sera de réaliser un programme unique qui résoudra pour la première fois un problème algorithmique simple de façon indépendante de la taille des données à traiter. Parallèlement, l'impact environnemental sera évalué pour valider la frugalité et déterminer le périmètre d'utilisation. Enfin, l'analyse de la structure d'un réseau de relations étant devenue centrale en analyse de données, la bibliothèque Software Heritage, qui recense les codes *open source*, servira de base d'expérimentation pour lancer des requêtes pour l'analyse des relations entre un million d'entités.

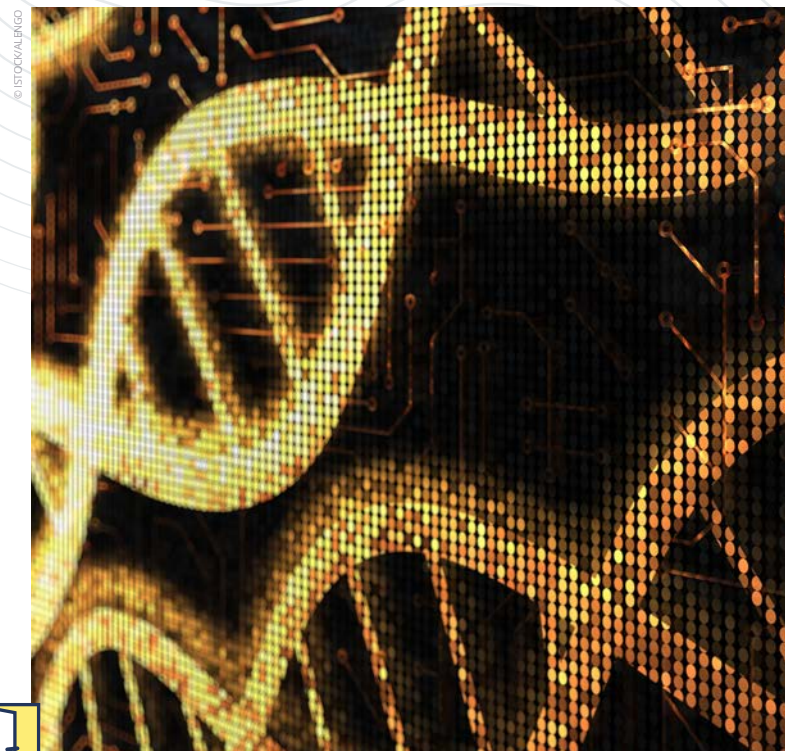
**Porteurs**

Anthony Genot  
Nicolas Schabanel



RISQUES

Créer un ordinateur moléculaire nécessite de bien maîtriser tous ses composants, y compris la création, l'exécution et la lecture des programmes ADN. Le périmètre d'application du calcul moléculaire dépendra par ailleurs du degré de performance et d'automatisation qui pourra être atteint, ainsi que de son coût énergétique et environnemental. ■



POTENTIEL  
D'INNOVATION

Pour de grands ensembles de données, les calculs deviennent limités dans les ordinateurs traditionnels par les échanges d'informations entre les données et la mémoire. Surmonter ce goulot d'étranglement constitue un enjeu majeur pour le développement du numérique. Parallèlement, le stockage d'ADN à faible coût est en train de démocratiser la technologie et attirera les utilisateurs avides de données. Le projet CalcADN sera une contribution essentielle pour libérer tout le potentiel du stockage et du calcul de données sur ADN. Seuls quelques groupes ont commencé à se pencher sur ces questions de recherche pour pouvoir répondre à la demande quand il s'agira de pétaoctets ou de exaocets de données stockées dans l'ADN. Le projet CalcADN participera ainsi à cimenter un leadership français dans ce domaine.



# Créer des fluides structurés aux enzymes actifs pour dégrader les biofilms bactériens ou les microplastiques



**IMPACT**

CatFoam combine la science de la physique et de la biochimie pour innover dans le domaine de la catalyse enzymatique. Les enzymes, reconnues pour leur efficacité et spécificité en chimie verte, catalysent des réactions dans des conditions douces (pH, température). Traditionnellement, les enzymes sont fixées sur des supports solides, mais cette approche peut réduire leur efficacité et leur adaptabilité. D'autre part, les fluides structurés, tels que les mousses et les émulsions, possèdent une structure interne unique qui leur confère des propriétés physiques remarquables. Le projet CatFoam vise à tirer parti de cette structure en y intégrant des enzymes, permettant ainsi de créer des fluides capables de capturer et de décomposer des substances nocives.

L'innovation réside dans l'association de ces deux ingrédients. En travaillant à l'échelle nanométrique et en exploitant les propriétés des interfaces liquides, CatFoam propose de développer des fonctionnalités innovantes pour les fluides structurés, ouvrant de nouvelles voies pour des applications industrielles et environnementales.

## Porteurs

Wiebke Drenckhan  
Christophe Chassenieux  
Fouzia Boulmedais  
Jean Farago



**VERROUS  
À LEVER**

Le premier défi du projet sera d'identifier les enzymes, ou les combinaisons d'enzymes, les plus aptes à doter les fluides structurés de propriétés fonctionnelles. Étant donné la sensibilité des enzymes à leur environnement, il sera essentiel de comprendre leur fonctionnement dans ce contexte. Il faudra également veiller à ce que les enzymes et leurs produits de réaction n'affectent pas la stabilité et les propriétés d'écoulement du fluide. Enfin, il sera crucial d'établir un couplage entre les propriétés (bio)chimiques des enzymes et le comportement physique du fluide pour optimiser leurs performances combinées.

# 65 %

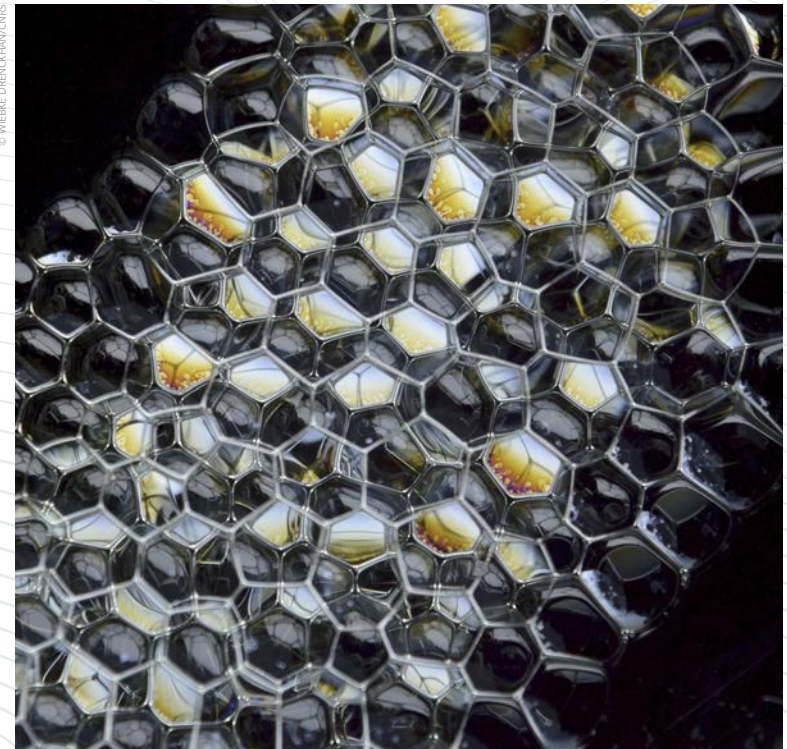
au minimum  
des infections  
nosocomiales  
seraient causées  
par des biofilms  
bactériens



**RISQUES**

Les principaux risques incluent la dénaturation des enzymes par le fluide et l'impact négatif de l'action enzymatique sur la stabilité du fluide structuré. ■

© WIEBKE DRENCKHAN/ICMIS



**POTENTIEL  
D'INNOVATION**

Le projet CatFoam vise à démontrer le potentiel des fluides structurés comme milieux réactionnels spécifiques, en tirant parti de leurs propriétés physiques uniques. Bien que le concept puisse s'appliquer à divers domaines, il se concentrera sur des enjeux environnementaux et sanitaires importants. Parmi ses objectifs, l'élimination des amas de bactéries (biofilms bactériens) qui sont responsables des résistances accrues aux antibiotiques dans les milieux hospitaliers, et la capture et dégradation des (micro)plastiques pour protéger l'environnement.

# Transformer les fibres optiques en réseaux denses de capteurs pour le suivi environnemental des milieux terrestres et marins



**IMPACT**

Le projet D-Light vise à franchir un nouveau cap dans l'instrumentation in-situ de l'environnement en exploitant et associant les différentes capacités de mesure des fibres optiques. En effet, la propagation du signal lumineux dans une fibre optique est influencée par les effets de contrainte et de température ; il est aujourd'hui possible de détecter ces perturbations pour transformer les câbles de fibre optique en réseaux denses de capteurs. À travers la surveillance in-situ des environnements souterrains, sous-marins et urbains, l'enjeu principal du projet est d'imager l'invisible et de se placer au plus près des processus pour les caractériser sur une large gamme d'échelles. En facilitant le suivi des environnements difficiles d'accès, via des mesures fiables et haute-résolution, les développements technologiques de ce projet seront un atout clé pour quantifier certains effets liés au changement climatique et/ou aux pressions anthropiques, et prévenir certains risques naturels. Le projet vise aussi à apporter des solutions concrètes pouvant impacter des domaines aussi variés que la géothermie, la gestion et la protection des ressources en eau, ou le suivi des infrastructures, créant ainsi des opportunités d'innovation et de valorisation industrielle.

## Porteurs

Anthony Sladen  
Olivier Bour



**VERROUS  
À LEVER**

Un premier verrou concerne l'influence sur la qualité des mesures de l'association entre les câbles de fibre optique et le milieu. Un autre verrou concerne la mise en synergie de différentes techniques de mesure par fibre optique pour dépasser l'état de l'art. L'objectif est ainsi de proposer de nouveaux systèmes d'observation qui génèrent des données uniques, par leur nature multi-physiques, leur précision, leur couverture spatiale ou encore leur résolution spatiale et temporelle.

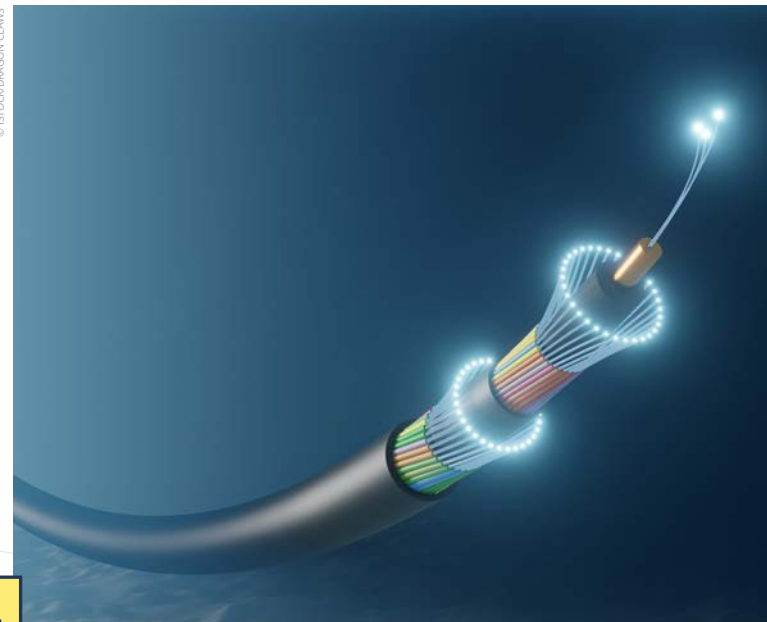


**RISQUES**

Les principaux risques du projet résident dans l'implémentation des nouveaux protocoles expérimentaux, notamment pour les milieux souterrains complexes et les environnements marins, et le développement et la mise en œuvre d'approches de mesure par fibre optique à haute résolution spatiale. Le coût élevé de certains déploiements sur le terrain ou en mer pourrait limiter l'échelle de certaines expérimentations et applications. ■

**1 million  
de kilomètres  
de câbles déjà  
au fond des océans**

© ISTOCK/DRAGON CLAVIS



**POTENTIEL  
D'INNOVATION**

En explorant l'utilisation de câbles fibres optiques à faible coût pour le suivi du sous-sol et infrastructures, ou via l'utilisation des câbles télécom existants et déjà très présents, le projet D-Light ouvre la voie à de nombreuses applications dans les domaines des villes intelligentes, du suivi géotechnique et environnemental, et de la surveillance maritime. En fournissant des données haute-résolution dans les domaines marins et souterrains sous-échantillonnés, le projet permettra le développement rapide et à moindre coût d'observatoires multidisciplinaires et opérationnels comme le suivi des nappes souterraines ou l'alerte rapide pour les risques naturels, y compris dans des endroits habituellement difficiles à instrumenter.



# Prévenir la pénurie annoncée de médicaments grâce à l'écocatalyse au palladium pour une industrie pharmaceutique durable



IMPACT

La catalyse au palladium est indispensable à l'industrie pharmaceutique. Selon une étude récente, 32 % des nouvelles petites molécules de l'industrie pharmaceutique approuvées chaque année sont issues d'une catalyse au palladium de type couplages croisés. Cette dépendance de l'industrie pharmaceutique vis-à-vis de la catalyse au palladium est très préoccupante. Le projet EcoPalladium repose sur une démarche interdisciplinaire nouvelle, capable de résoudre des problèmes clés de l'industrie pharmaceutique, selon une approche « One-Health ». La première étape permet le recyclage écologique de métaux stratégiques tels que le palladium. La technologie s'appuie sur la transformation d'espèces végétales envahissantes spécifiques. Il s'agit d'une opportunité pour soutenir dans la durée les efforts de récoltes intensives de ces espèces, et de préserver les écosystèmes impactés. Dans une seconde étape, les biomatériaux générés sont transformés en des outils performants pour la synthèse durable d'agents anticancéreux, avec des indicateurs environnementaux exigeants et ambitieux. La technologie repose sur une innovation : l'écocatalyse au palladium. L'objectif global est de faciliter l'accès à des médicaments coûteux, de façon sobre et écoconçue.

## Porteurs

Claude Grison  
Peter Hesemann



VERROUS À LEVER

Les coûts de production d'un principe actif sont élevés à cause du catalyseur au palladium et des opérations de purification du principe actif pour répondre aux normes réglementaires pharmaceutiques. Le défi est de développer une approche intégrée et durable de la synthèse des principes actifs, avec des applications potentielles dans le domaine de l'oncologie.



RISQUES

La stratégie du projet est en rupture conceptuelle et technologique totale avec la démarche conventionnelle. La matière première ne serait plus d'origine minière et métallurgique, mais des espèces végétales sélectionnées pour la capacité de leurs systèmes racinaires à séquestrer le palladium. Un traitement direct de la poudre végétale enrichie en palladium conduit à de nouveaux biomatériaux nanostructurés. Leurs compositions et structures sont inédites et totalement inconnues en synthèse organique. Un des grands défis du projet est de confirmer l'activité catalytique de ces écocatalyseurs à base de palladium, très actifs et peu coûteux, pour la synthèse de cibles pharmaceutiques. ■

32 %

des nouvelles petites molécules pharmaceutiques issues de la catalyse au palladium

© CYRIL FRESILLON / CHIRMECO / CHRIS IMAGES



Les espèces exotiques envahissantes (ici *Ludwigia peploides*) : un des cinq facteurs clés responsables du déclin de la biodiversité



POTENTIEL D'INNOVATION

Cette approche globale a permis de construire une démarche innovante, qui suggère la remise en cause de certains concepts figés ou préétablis dans le domaine de la recherche en catalyse au palladium. La réussite de ce projet pourrait ainsi être le point de départ d'une nouvelle synergie entre recherche fondamentale en chimie pharmaceutique, verrous industriels, et transition écologique. Parallèlement, des perspectives précises émergent déjà pour étudier le recyclage écologique d'autres métaux stratégiques, dans d'autres secteurs industriels (électronique, énergie verte).



# Développer un accélérateur de particules à récupération d'énergie, à l'efficacité énergétique sans précédent



**IMPACT**

Inventés il y a 100 ans, les accélérateurs de particules sont des instruments exceptionnels pour étudier les lois fondamentales de l'Univers et aussi pour des domaines d'applications sociétales multiples, comme l'imagerie, la santé ou l'énergie. Leur remarquable développement s'appuie sur des faisceaux toujours plus puissants pour des investigations toujours plus poussées. Mais cela requiert une consommation électrique de plus en plus élevée. Si les accélérateurs ont largement prouvé leur valeur pour la société, ils doivent maintenant relever le défi de la durabilité énergétique.

Le projet propose une rupture technologique avec un accélérateur linéaire à récupération d'énergie, appelé ERL, qui possède un énorme potentiel d'économies. En effet, l'idée sera de réduire drastiquement la consommation électrique des structures accélératrices en réemployant l'énergie des faisceaux précédents. Avec ce concept, un nouveau type d'accélérateur plus compact, moins coûteux et à faible consommation électrique pourra voir le jour. Il pourra être déployé pour toutes les applications où les faisceaux accélérés interagissent faiblement, comme avec un laser ou un autre faisceau. L'instrument sera adapté en fonction de l'utilisation envisagée pour couvrir un large éventail d'applications.



**VERROUS À LEVER**

Un ERL récupère l'énergie des faisceaux qui circulent dans l'accélérateur pour minimiser la consommation électrique de l'installation. Après l'utilisation d'un faisceau accéléré, son énergie est restituée aux structures accélératrices pour accélérer le faisceau suivant. L'opération ininterrompue et à forte puissance de l'installation requiert la construction d'un injecteur d'électrons de forte intensité. De plus, il est crucial de développer des structures d'accéléra-

## Porteurs

Maud Baylac  
Walid Kaabi

## Diviser par

# 10

la consommation électrique des structures d'accélération du démonstrateur

tion aux performances inédites afin de garantir le fonctionnement de l'instrument dans un mode permettant à la fois l'accélération des particules, puis la récupération de leur énergie.



**RISQUES**

Les principaux risques incluent la capacité à concevoir et mettre en œuvre efficacement la source d'électrons. D'autre part, le concept de l'ERL à un tel niveau de puissance n'a encore jamais été validé au niveau mondial, ce projet permettra d'en évaluer la faisabilité technique. ■

Exemple d'accélérateur linéaire d'électrons : ThomX



**POTENTIEL D'INNOVATION**

Doté d'une efficacité énergétique sans précédent, l'ERL offre un concept révolutionnaire d'accélérateurs. Ils seront incontournables pour la recherche fondamentale, notamment sur les futurs collisionneurs en physique des particules et nucléaire. Ils permettront également de développer des sources de rayons X à haute énergie. Ces sources ont un fort impact dans des domaines appliqués, comme les radiothérapies innovantes ciblant les tumeurs tout en préservant les tissus sains, l'imagerie biomédicale à ultra haute résolution pour des maladies comme Alzheimer, ou encore l'imagerie du patrimoine culturel et des matériaux. Ce projet positionne la France à la pointe de la compétition internationale.

# Comprendre la diversité des langues et leur transmission en contexte plurilingue



IMPACT

L'étude du langage, faculté essentielle à l'humanité, réclame d'analyser les langues dans leur diversité. L'Océanie, avec ses 1 300 langues — dont beaucoup sont menacées d'extinction — représente 20 % de cette diversité. Le projet HéLiCéO vise à comprendre comment cette mosaïque linguistique s'est développée historiquement, au fil des migrations et des rencontres entre populations, donnant naissance au paysage plurilingue que l'on observe aujourd'hui. Étudier les langues océaniques, c'est comprendre ce qui les rend uniques, tout en les situant parmi les tendances universelles du langage. Elles se sont développées dans des sociétés de tradition orale, où le plurilinguisme se transmet, encore aujourd'hui, dès la petite enfance. Face aux pressions économiques et au défi de la mondialisation, ces langues sont aujourd'hui fragilisées ; HéLiCéO veut contribuer à définir leur place, dans une francophonie respectueuse de la diversité culturelle. En impliquant des jeunes chercheurs locaux, le projet formera une nouvelle génération de spécialistes. En consolidant les identités culturelles, ces recherches promeuvent le vivre-ensemble, enjeu socio-politique crucial dans la région indopacifique.

## Porteurs

Jacques Vernaudeau  
Alejandrina Cristia  
Alexandre François  
Marie Salaun



VERROUS À LEVER

# 20 %

des langues du monde sont concentrées en Océanie

Étudier des cultures minorisées implique un dilemme entre la libre diffusion des connaissances et le respect des savoirs autochtones ; mais les liens tissés entre l'équipe d'HéLiCéO et les communautés locales aideront à trouver un point d'équilibre.

Un autre défi est le vaste nombre de langues à documenter — plusieurs centaines. Sur ce point, les porteurs du projet s'appuieront sur leur expérience du terrain ; des protocoles méthodologiques innovants permettront d'échantillonner les langues les plus représentatives.



RISQUES

L'exode des jeunes générations vers les villes implique un déracinement : pour certaines langues, les locuteurs natifs sont peu nombreux, et plus difficiles à identifier. La collaboration avec les partenaires locaux, et notamment avec les universités du Pacifique, permettra d'identifier les acteurs clés pour chaque région, détenteurs des savoirs linguistiques et culturels les plus précieux. ■



Dans l'île de Hiw (Vanuatu), cette communauté de tradition orale découvre sa langue écrite pour la première fois, dans un livre d'apprentissage créé en 2011.



POTENTIEL D'INNOVATION

HéLiCéO développera plusieurs innovations, notamment de nouveaux protocoles d'enquête linguistique et psycholinguistique. Des ressources numériques seront créées pour l'étude et la promotion des langues océaniques, comme des grammaires, dictionnaires et corpus de littérature orale. Des bases de données comparatives seront établies pour situer ces langues dans un contexte universel, ou pour reconstituer leurs évolutions historiques. Enfin, des documents de synthèse, intégrant des approches éducatives, cognitives et anthropologiques, serviront à inspirer de nouvelles pratiques pédagogiques, et à renouveler les politiques linguistiques et éducatives en Outre-mer.



# Modéliser et simuler certains systèmes quantiques par de nouvelles approches mathématiques



IMPACT

Modéliser la matière à l'échelle microscopique exige de tenir compte des effets quantiques, et donc en principe de résoudre l'équation de Schrödinger. Malheureusement, ce calcul ne peut être réalisé à l'heure actuelle, tant il est complexe et coûteux numériquement. La méthode la plus utilisée pour contourner cette difficulté dans les applications académiques et industrielles s'appelle la théorie de la fonctionnelle de la densité. Cette théorie, qui a explosé dans les années 1990, mobilise grandement la communauté scientifique. Avec plusieurs dizaines de milliers de brevets, elle a aussi un grand impact sur les développements technologiques. Le projet MaQul se propose de lever trois verrous célèbres de cette théorie. Le premier concerne la modélisation de systèmes qui évoluent loin d'un équilibre. Ceci aura notamment un grand impact dans le domaine en plein essor de la photochimie attoseconde, c'est-à-dire l'étude des processus physico-chimiques sous l'action de la lumière, à l'échelle du milliardième de milliardième de seconde. L'enjeu ultime est de contrôler finement la réactivité chimique. Le second défi concerne la prise en compte du comportement des électrons lorsqu'ils atteignent des vitesses élevées. Ceci permettra de traiter de façon fiable les composés chimiques contenant des atomes lourds, ce qui est crucial en toxicologie et pour le retraitement des déchets nucléaires. Le troisième axe du projet concerne la description de matériaux moirés, comme par exemple deux couches de graphènes superposées avec un angle spécifique. De tels systèmes servent de plateforme pour mieux comprendre la supraconductivité non-conventionnelle, avec des applications attendues dans les technologies de l'énergie, des transports et de l'information.

## 60 000

brevets au moins utilisent des méthode de théorie de la fonctionnelle de la densité

### Porteurs

Mathieu Lewin  
Éric Cancès  
Julien Toulouse



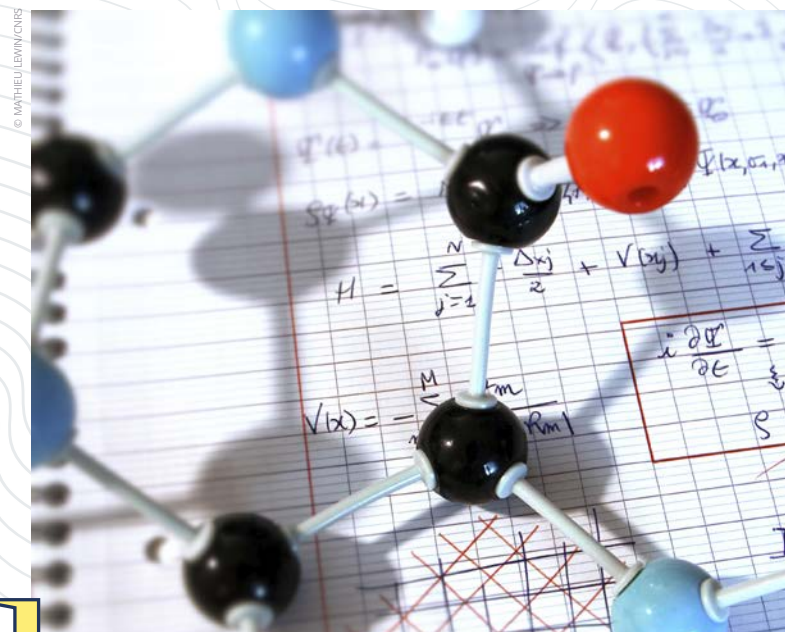
VERROUS À LEVER

S'ils traitent de systèmes chimiques ou physiques parfois différents, les problèmes posés ont en réalité de nombreux points communs du côté des difficultés et verrous mathématiques. Si résoudre une question ne fera pas immédiatement en tomber une autre, le projet compte s'appuyer sur les multiples liens entre elles. Toute découverte aura un impact dans les domaines pour lesquels la très haute dimension de l'équation de Schrödinger rend sa résolution impossible et impose de passer par la théorie de la fonctionnelle de la densité.



RISQUES

Il s'agit d'un projet à haut risque car les problèmes abordés ont largement résisté aux efforts des physiciens et chimistes depuis des dizaines d'années. L'espoir est de tenter de lever ces verrous avec une approche plus mathématique. Grâce au caractère fortement interdisciplinaire de l'équipe du projet, les nouvelles idées abstraites pourront être immédiatement testées numériquement et plus vite passées vers les applications. ■



POTENTIEL D'INNOVATION

Ce projet se positionne en amont et se centre sur la modélisation et la simulation. Cependant, le développement de nouveaux modèles devrait influencer positivement les applications réelles sur le plus long terme.

# Innové en agroécologie et dans la lutte anti-terroriste grâce à la détection bio-inspirée d'odeurs par les insectes



IMPACT

Certains animaux présentent la caractéristique unique de pouvoir détecter quelques molécules présentes dans des m<sup>3</sup> d'air. Les chiens, par exemple, sont connus pour être meilleurs que l'humain, mais les insectes les surpassent. En effet, pour se reproduire, les insectes doivent détecter des phéromones à des quantités infinitésimales. Le papillon du vers à soie est particulièrement intéressant car il réussit à détecter une molécule de phéromone dans 1 m<sup>3</sup> d'air, probablement par les flux d'air complexes que provoquent ses antennes multi-échelles. Sur le plan scientifique, certaines étapes de l'olfaction sont bien maîtrisées, en particulier celles survenant lors de l'orientation à longue distance (macro-échelle) et celles une fois les molécules fixées aux récepteurs (micro-échelle). En revanche les mécanismes amont de l'olfaction sont quasi inconnus, depuis l'émission à partir des glandes à phéromones, au transport d'odeur (ici phéromones) par aérosols, puis aux processus du point de capture de l'odorant jusqu'au pore olfactif (mésos-échelle).



VERROUS À LEVER

Les deux verrous identifiés sont tous deux des questions d'échelle. Le verrou principal est le changement d'échelle entre des organes de l'ordre de 1 cm (antenne) à des structures de 10 cm à 1 m pour les applications qui en seront faites. Il y a donc une importance des lois aérodynamiques qui changent en fonction de l'échelle considérée. L'impression 3D de structures architecturalement complexes (antennes d'insectes) contenant des éléments variant jusqu'à 4 fois d'ordre de grandeur (de la sensille de 5 micromètres à l'antenne de 2 cm) constitue le verrou secondaire, conséquence de la géométrie multi-échelles des objets biologiques.

**70 milliards de \$/an**

pour la lutte contre les espèces d'insectes ravageuses

Porteur

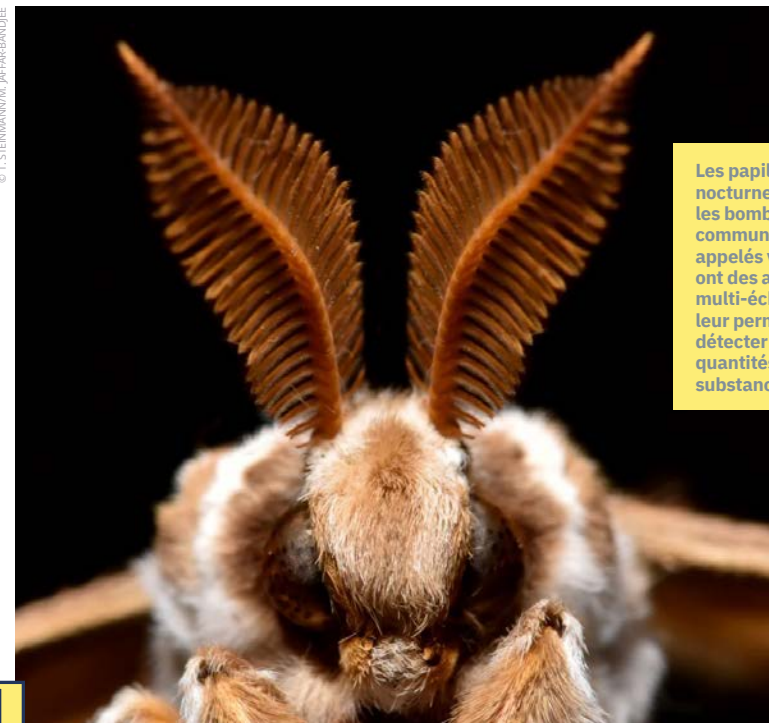
Jérôme Casas



RISQUES

Plusieurs ruptures fortes du projet sont identifiées, de par l'impact que peut avoir la preuve d'un transport par aérosol. En effet, le dogme selon lequel une seule molécule induit une impulsion nerveuse doit être révisé et la construction d'un nez actif permettant une meilleure capture ouvre un champ de possibilités technologiques. ■

© T. STERNMANN/ALAMY/ALAMY



Les papillons nocturnes tels que les bombycides, communément appelés vers à soie, ont des antennes multi-échelles qui leur permettent de détecter d'infimes quantités de substances

POTENTIEL D'INNOVATION

Ce projet pourra aboutir à une implémentation bioinspirée dans deux domaines d'application impactants. Dans l'agroécologie, il sera possible de lutter contre les espèces ravageuses invasives en améliorant l'émission de phéromones par diffuseurs bio-inspirés. L'objectif sera d'émettre à plus faible concentration des phéromones sexuelles, ce qui abaissera le coût de cette lutte biologique et facilitera ainsi sa pénétration du marché. À ce jour les quantités utilisées sont importantes avec un effet limité en raison d'une mauvaise compréhension des processus de diffusion. Par ailleurs, dans la lutte anti-terroriste, cela permettra d'innover dans la détection d'explosifs et de mines anti-personnelles, ces dernières faisant environ 5 000 morts et blessés par an dans le monde, cette statistique étant en augmentation. La création de nouveaux nez pour les robots, plus sensibles et plus rapides, intégrera des mécanismes olfactifs actifs facilitant la capture de molécules très peu volatiles pour la recherche d'explosifs.



# Contrôler la synthèse de molécules et les propriétés des matériaux



IMPACT

Les fluctuations électromagnétiques, ou quantiques, sont omniprésentes dans l'Univers. Un grand nombre de propriétés de la matière sont influencées par l'interaction entre la matière et ces fluctuations. Des recherches démarrées en France il y a une quinzaine d'années ont démontré qu'en exaltant cette interaction dans des cavités optiques, il est possible de modifier radicalement certaines de ces propriétés, notamment la réactivité chimique. Il est possible d'accélérer ou de ralentir des réactions chimiques en faisant interagir les réactifs avec les fluctuations confinées dans ces cavités. Cette méthode permet aussi de favoriser une réaction chimique spécifique dans un contexte où plusieurs pourraient se produire. Ce phénomène a donné naissance à la chimie polaritonique, un domaine en pleine expansion. En pratique, en plaçant des molécules sur un réseau de nano-trous ou en utilisant des miroirs distants de quelques micromètres, il est possible de modifier aussi des propriétés telles que la conductivité, le magnétisme ou encore l'activité enzymatique. Fait surprenant, ces effets peuvent être induits sans lumière, grâce aux fluctuations quantiques du vide, qui entrent en résonance avec les molécules ou les matériaux.

## Porteurs

Thomas Ebbesen  
Cristiano Ciuti  
Cyriaque Genet

Multiplier par  
**1 million**  
la conductivité  
du polystyrène



VERROUS À LEVER

La chimie polaritonique, située à l'interface de l'électrodynamique quantique et des sciences des matériaux, présente une complexité considérable. Ce domaine soulève de nouvelles questions scientifiques nécessitant une compréhension approfondie des processus sous-jacents pour mieux prédire leurs effets. Ce travail de compréhension est essentiel pour développer de nouveaux outils théoriques et expérimentaux, qui serviront à la fois la recherche fondamentale et le développement technologique.



RISQUES

La complexité des processus associés à ces nouveaux effets constitue un risque inhérent au projet. En analysant un large éventail de réactions, il sera possible d'identifier et de comprendre les paramètres clés influençant la réactivité dans la chimie polaritonique. ■



POTENTIEL D'INNOVATION

La chimie polaritonique et les matériaux polaritoniques offrent des outils innovants pour concevoir et contrôler les propriétés de la matière, promettant d'améliorer les procédés et produits industriels. Cette approche permettant de contrôler la sélectivité des réactions chimiques, elle pourra contribuer à réduire l'empreinte énergétique lors de la synthèse de molécules. L'objectif est d'encourager les industries chimiques et pharmaceutiques, notamment en Europe, à intégrer ce savoir-faire technologique. De plus, des améliorations significatives de la conductivité et magnétisme des matériaux ouvrent de nouvelles perspectives d'applications, notamment en spintronique. Ce potentiel d'innovation suscite un intérêt international, révélant des possibilités technologiques jusqu'alors insoupçonnées.

# Lutter contre les neuroinfections en étudiant les protéines de chaque cellule individuellement dans leur environnement



IMPACT

L'analyse du vivant a connu de nombreux bouleversements lors de cette dernière décennie, notamment avec l'avènement des techniques dites « omiques » (analyse globale, non biaisée). Ces approches ont par exemple permis d'analyser l'impact des infections virales sur le cerveau. Le projet ProteoVir vise à mesurer la diversité et la quantité de protéines contenues dans chaque cellule, une par une, tout en conservant les informations liées à son environnement. Lors d'une infection, la nature et la quantité de protéines cellulaires vont être significativement modulées. Pouvoir identifier précisément ces changements permet d'associer une signature de protéines à la réaction de chaque cellule de façon individuelle. La rupture technologique proposée doit permettre de cartographier de façon extrêmement fine les perturbations associées aux infections virales, non seulement au regard de la cellule infectée, mais également sur les cellules voisines non infectées mais exposées à une cellule « malade ». Ces approches donneront accès à un niveau d'informations inégalé jusqu'ici, qui devraient permettre à plus long terme d'imaginer des stratégies thérapeutiques ciblant spécifiquement les cellules « anormales », tout en épargnant les cellules saines, ainsi applicables aux maladies infectieuses et au-delà.

## Porteurs

Raphaël Gaudin  
Myriam Ferro  
Jean-Christophe Olivo-Marin



VERROUS À LEVER

L'intelligence artificielle doit permettre d'isoler de façon automatisée les cellules dans le tissu. Il est également essentiel d'être capable d'isoler et transférer physiquement une cellule unique tout en préservant l'échantillon. Enfin, l'analyse statistique des grandes masses de données et leur interprétation dans un contexte spatial représente un autre verrou important.



RISQUES

À l'heure actuelle, la sensibilité d'analyse sur une plateforme de spectrométrie de masse ne permet pas d'obtenir un nombre de protéines identifiées et quantifiées par cellule qui conserve la localisation de chaque cellule dans le tissu. Il est donc nécessaire de développer des techniques de détection suffisamment sensibles pour associer à une seule cellule des centaines ou milliers de protéines présentes et de pouvoir les replacer dans leur microenvironnement. En deuxième étape, il est essentiel de pouvoir augmenter le débit d'analyse pour pouvoir faire des centaines de cellules dans un même tissu en temps raisonnable. ■

**10 000**

cellules individuelles minimum pour lesquelles le contenu protéique sera identifié

© DIANA ERICHA & RAPHAËL GAUDIN

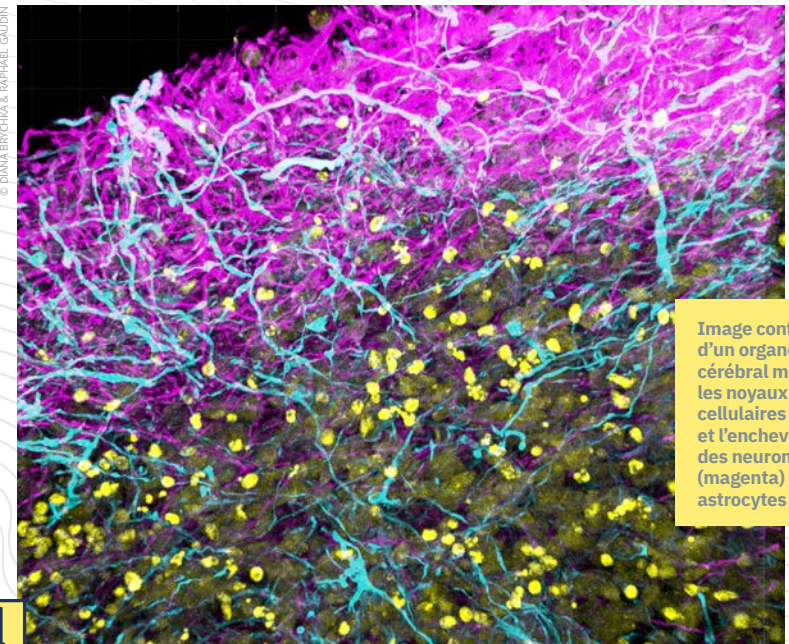


Image confocale d'un organoïde cérébral montrant les noyaux cellulaires (jaune) et l'enchevêtrement des neurones (magenta) et astrocytes (cyan)



POTENTIEL D'INNOVATION

Ce projet va apporter une puissance d'analyse inégalée qui va changer la façon d'aborder les questions des sciences du vivant. Hier, une maladie était diagnostiquée par des symptômes souvent non spécifiques. Aujourd'hui, les recherches sur les corrélations entre pathologies et mécanismes moléculaires ont permis de produire des tests diagnostiques robustes. Demain, l'analyse d'une pathologie cellule par cellule, dans leur environnement, révélant l'impact plus profond d'une perturbation, permettra de voir au-delà des symptômes « visibles », et ainsi de pouvoir les traiter, menant in fine à une meilleure prise en charge personnalisée des patients.



# Découvrir la matière noire légère



IMPACT

La matière noire représente l'un des plus grands défis de la physique moderne, avec 30 ans de recherches intensives. Ce phénomène est crucial en physique des particules, astrophysique et cosmologie. Le projet TES4DM ambitionne de détecter la matière noire sur une échelle de 12 ordres de grandeur en masse, allant de fractions d'électronvolt (eV) à la masse du proton, une capacité inédite dans le domaine. Pour ce faire, TES4DM, en lien avec la collaboration franco-américaine TESSERACT, utilise divers matériaux cibles et de nouvelles technologies de détecteurs cryogéniques ultra-sensibles. Le projet positionne la France en leader dans la recherche sur la matière noire légère, en installant ses expériences au Laboratoire souterrain de Modane, le plus profond d'Europe. Ce site permet d'intégrer des technologies de pointe en matière de détection, consolidant ainsi l'expertise française reconnue au niveau mondial dans ce domaine, tout en ouvrant de nouvelles voies dans la compréhension de l'Univers.

## Porteurs

Julien Billard  
Stefanos Marnieros  
Silvia Scorza



VERROUS  
À LEVER

Pour atteindre ses objectifs scientifiques, le projet TES4DM doit surmonter plusieurs défis majeurs. Il s'agit notamment de développer une technologie de détecteur cryogénique et semi-conducteur hybride capable de détecter la matière noire interagissant avec les noyaux et les électrons. Il est crucial d'établir des méthodes efficaces pour identifier les signaux de matière noire tout en rejetant les bruits de fond, même à des niveaux d'énergie très faibles de quelques électronvolts. Ces points sont essentiels pour garantir des sensibilités sans précédent et lever la limite actuelle des capacités des expériences cryogéniques.

# 85 %

de matière noire  
dans l'Univers

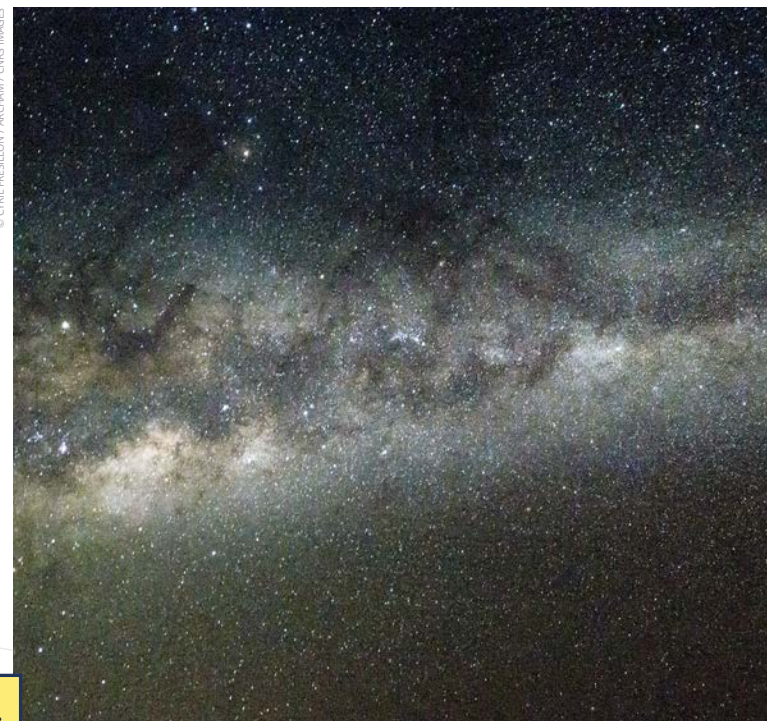


RISQUES

Les principaux risques incluent la difficulté d'atteindre les performances de détection attendues et de faire passer les seuils de détection de quelques dizaines d'eV à une centaine de meV.

La gestion du bruit de fond à très basse énergie représente également un défi critique pour le réduire à moins de 100 eV. Chaque risque a été évalué, et des solutions techniques sont déjà identifiées ou en cours d'élaboration par TES4DM. ■

© CYRIL FREILLOU / ARCHAM / CNRS IMAGES



POTENTIEL  
D'INNOVATION

Le projet TES4DM engendrera des retombées scientifiques, sociétales et technologiques significatives. Scientifiquement, il vise à améliorer les sensibilités à la matière noire, impactant la physique des particules, l'astrophysique et la cosmologie. Sur le plan sociétal, il pourra faciliter la détection des antineutrinos des réacteurs nucléaires, offrant ainsi un meilleur monitoring et contribuant à la non-prolifération des matériaux fissiles. Enfin, sur le plan technologique, la recherche sur les bruits de fond à très basse énergie pourrait révolutionner le calcul quantique. En effet, ces bruits, souvent causés par des excès de chaleur parasites et la radioactivité environnante, limitent le temps de cohérence des qubits. La résolution de ce bruit rendra leur fabrication plus efficace.

## ALEAS

- **Bérengère Dubrulle**, directrice de recherche CNRS, laboratoire Service de physique de l'état condensé (SPEC - CEA/CNRS)
- **Guillaume Balarac**, professeur à Grenoble INP, Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (LEGI - CNRS/Université Grenoble Alpes)
- **Mickaël Bourgain**, directeur de recherche CNRS, Laboratoire de Physique (LPENSL - CNRS/ENS Lyon)

## CalcADN

- **Anthony Genot**, directeur de recherche CNRS, Laboratory for Integrated Micro Mechatronics Systems (LIMMS - CNRS/University of Tokyo)
- **Nicolas Schabanel**, directeur de recherche CNRS, Laboratoire de l'informatique du parallélisme (LIP - CNRS/ENS Lyon/Université Claude Bernard Lyon 1)

## CatFoam

- **Wiebke Drenckhan**, directrice de recherche CNRS, Institut Charles Sadron (ICS - CNRS)
- **Christophe Chassenieux**, professeur à Le Mans Université, Institut des Molécules et Matériaux du Mans (IMMM - CNRS/Le Mans Université)
- **Fouzia Boulmedais**, directrice de recherche CNRS, Institut Charles Sadron (ICS - CNRS)
- **Jean Farago**, professeur à l'Université de Strasbourg, Institut Charles Sadron (ICS - CNRS)

## D-Light

- **Anthony Sladen**, chargé de recherche CNRS, laboratoire GéoAzur (CNRS/IRD/Observatoire de la Côte d'Azur/Université Côte d'Azur)
- **Olivier Bour**, professeur à l'Université de Rennes, laboratoire Géosciences Rennes (CNRS/Université de Rennes)

## EcoPalladium

- **Claude Grison**, directrice de recherche CNRS, laboratoire Chimie Bio-Inspirée et Innovations Écologiques (ChimEco - CNRS)
- **Peter Hesemann**, directeur de recherche CNRS, Institut Charles Gerhardt Montpellier (ICGM - CNRS/ENSCM/Université de Montpellier)

## ERL4ALL

- **Maud Baylac**, ingénieure de recherche CNRS, Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (LPSC - CNRS/Université Grenoble Alpes)
- **Walid Kaabi**, ingénieur de recherche CNRS, Laboratoire de physique des 2 infinis - Irène Joliot-Curie (IJCLab - CNRS/Université Paris-Saclay)

## HéLicéO

- **Jacques Vernaudon**, professeur à l'Université de la Polynésie française, Maison des Sciences de l'Homme du Pacifique (MSH-P - CNRS/Université de la Polynésie française)
- **Alejandrina Cristia**, directrice de recherche CNRS, Laboratoire de sciences cognitives et psycholinguistique (LSCP - CNRS/EHESS/ENS - PSL)
- **Alexandre François**, directeur de recherche CNRS, laboratoire Langues, Textes, Traitements informatiques, Cognition (LATTICE - CNRS/ENS - PSL/Université Sorbonne Nouvelle)
- **Marie Salaun**, professeure à l'Université Paris Cité, Unité de recherche Migrations et Société (URMIS - CNRS/IRD/Université Côte d'Azur/Université Paris Cité)

## MaQuI

- **Mathieu Lewin**, directeur de recherche CNRS, Centre de recherche en mathématiques de la décision (CEREMADE - CNRS/Université Paris Dauphine - PSL)
- **Éric Cancès**, professeur à l'École des Ponts ParisTech, CERMICS
- **Julien Toulouse**, professeur à Sorbonne Université, Laboratoire de Chimie Théorique (LCT - CNRS/Sorbonne Université)

## PheroInnov

- **Jérôme Casas**, professeur à l'Université de Tours, Institut de recherche sur la biologie de l'insecte (IRBI - CNRS/Université de Tours)

## Polaritonic

- **Thomas Ebbesen**, professeur à l'Université de Strasbourg, Institut de Science et d'Ingénierie Supramoléculaires (ISIS - CNRS/Université de Strasbourg)
- **Cristiano Ciuti**, professeur à l'Université Paris Cité, Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques (MPQ - CNRS/Université Paris Cité)
- **Cyriaque Genet**, directeur de recherche CNRS, Institut de Science et d'Ingénierie Supramoléculaires (ISIS - CNRS/Université de Strasbourg)

## ProteoVir

- **Raphaël Gaudin**, directeur de recherche CNRS, Institut de Recherche en Infectiologie de Montpellier (IRIM - CNRS/Université de Montpellier)
- **Myriam Ferro**, directrice de recherche CEA, Proteomics French Infrastructure (ProFI - CEA/CNRS)
- **Jean-Christophe Olivo-Marin**, professeur à l'Institut Pasteur, Unité d'Analyse d'Images Biologiques (CNRS/Institut Pasteur)

## TES4DM

- **Julien Billard**, directeur de recherche CNRS, Institut de Physique des deux Infinis de Lyon (IP2I Lyon - CNRS/Université Claude Bernard Lyon 1)
- **Stefanos Marnieros**, chargé de recherche CNRS, Laboratoire de physique des 2 infinis - Irène Joliot-Curie (IJCLab - CNRS/Université Paris-Saclay)
- **Silvia Scorza**, directrice de recherche CNRS, Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (LPSC - CNRS/Université Grenoble Alpes)



# Tutelles principales (hors CNRS) des laboratoires des porteurs

