



Le CEA-Irig, Institut de Recherche Interdisciplinaire de Grenoble, mène des recherches en biologie, santé, nanosciences, cryotechnologies et nouvelles technologies pour l'énergie et l'environnement. Sur la photo : élaboration de nanomatériaux en couches minces.

D. MOREL / CEA

STRATÉGIE

Le CEA-Irig : fabrique de savoirs



P. JAVET / DR CEA

ACTUALITÉ

Lancement du PEPR Spin

P. 2



© SPARTAN SPACE

DR

ACTUALITÉ

Objectif Lune pour les technologies du CEA

P. 3

**TALENTS**

Écrans : la révolution ne fait que commencer

P. 24

> ÉVÉNEMENT

Lancement du programme Spin numérique "frugal"

Le programme de recherche PEPR⁽¹⁾ exploratoire sur la Spintronique (et appelé Spin) a officiellement été lancé à Grenoble le 29 janvier dernier. Doté d'un financement de 38 millions d'euros sur huit ans émanant du plan d'investissement d'Avenir France 2030, ce programme ambitieux porte sur les innovations spintroniques pour un numérique plus frugal, agile et durable. Piloté par le CEA et le CNRS qui coordonnent la vision stratégique nationale, il s'appuiera sur un vaste écosystème de partenaires académiques de la communauté française (plus de 440 chercheurs au sein de 47 laboratoires), et favorisera les synergies européennes. Il s'agira de contribuer à la compétitivité et à la souveraineté de l'Europe dans les nouvelles technologies de la transition numérique.

La croissance du monde numérique a un coût environnemental qui ne peut plus être ignoré. Les prévisions montrent qu'à l'horizon 2030, il sera responsable de 20 à 30 % de la consommation mondiale d'électricité. Le changement de paradigme nécessaire devra placer la frugalité énergétique des futurs dispositifs électroniques comme un critère majeur de performance, au même titre que la puissance de calcul, la vitesse, la miniaturisation ou le coût.

"La spintronique, en tant que véritable percée conceptuelle, est porteuse de solutions disruptives pour aborder ce problème majeur du



P. JAVET / DR CEA

Les invités CEA, CNRS, ANR (Agence nationale de la Recherche) et Thales et les directeurs de programme, Lucian Prejbeanu et Vincent Cros, réunis à l'occasion du lancement officiel du PEPR Spin à Grenoble le 29 janvier dernier.

numérique de demain. Elle offre des fonctionnalités accrues par rapport à l'électronique traditionnelle, en exploitant le spin de l'électron en plus de sa charge, associée à une faible consommation d'énergie grâce à la nature non volatile du magnétisme, souligne Lucian Prejbeanu, chef du département de Nanophysique (Dephy) au CEA-Irig, directeur de Spintec, et responsable du programme pour le CEA. Cette science est déjà au cœur de l'activité de Spintec, le service Spintronique et Technologie des Composants."

Bien qu'elle soit encore considérée comme émergente, la spintronique "a révolutionné par exemple le stockage et le calcul informatique avec les têtes de lecture des disques durs fonctionnant grâce aux découvertes sur l'électronique de spin à la fin des années 1990, explique Vincent Cros, directeur du programme Spin pour le CNRS. Cette révolution se poursuit depuis avec les mémoires MRAM développées à partir des années 2000".

Des thématiques avancées

Le programme explorera plusieurs grands domaines, dont les capteurs de champs magnétiques, déjà utilisés par exemple dans les systèmes embarqués à bord des automobiles, le

stockage informatique, le calcul informatique, la communication sans fil et l'intelligence artificielle. Les moyens alloués vont être concentrés sur des thématiques avancées allant de composants intégrant directement de l'intelligence artificielle à des capteurs plus autonomes ou des outils de calculs à faible consommation d'énergie.

Ils bénéficieront également à une recherche ouvrant la porte à des disciplines connexes, comme la physique quantique ou la biologie, mais aussi au développement indispensable de matériaux innovants étudiés et utilisés à l'échelle du milliardième de mètre. Le programme visera aussi à limiter l'utilisation de matériaux critiques comme les terres rares et répondre à des enjeux de souveraineté dans l'électronique. Il touche aussi bien à la physique des matériaux qu'à des travaux de recherche fondamentale, comme celui sur les skyrmions, des particules "virtuelles" qui pourraient être manipulées pour réaliser des calculs informatiques. Le programme de recherche (PEPR) exploratoire Spintronique (PEPR Spin) de France 2030, associera dix-sept Universités, notamment les Universités partenaires Grenoble-Alpes, Paris-Saclay et Lorraine afin de structurer et dynamiser la

pour une économie

communauté spintronique française, ainsi que des industriels et des start-up. Du fait de son fort potentiel dans de nombreux domaines du numérique, le PEPR Spin nouera d'étroites collaborations avec le PEPR Électronique démarré en 2023, et aussi avec les PEPR Technologies quantiques, Réseaux du futur, Matériaux émergents et Intelligence artificielle.

Des perspectives entièrement nouvelles

Les résultats et développements prévus pourront s'inscrire dans la stratégie nationale sur les composants, systèmes et infrastructures numériques, ainsi que dans celle des nouvelles agences annoncées par le président de la République le 7 décembre dernier. Au-delà, à l'échelle européenne, ils pourront apporter de nouvelles opportunités dans le cadre du programme European Chips Act, qui vise à retrouver la compétitivité et la résilience dans les technologies et applications des semi-conducteurs. Il a pour objectif de soutenir des projets collaboratifs phares et des appels ouverts à projets spécifiques, d'attirer des talents par le financement de projets "Jeune scientifique", d'étoffer le volet formation pour

préparer aux métiers de demain en spintronique et dans les technologies attenantes et de favoriser les synergies européennes, notamment dans le cadre du réseau Spintronic Factory initié en 2016 par les laboratoires Spintec et Albert Fert pour consolider la communauté et augmenter l'impact industriel des applications spintroniques dans l'Union européenne.

"Grâce à ce PEPR, la forte dynamique de la spintronique ouvrira des perspectives entièrement nouvelles dans les domaines du calcul, de l'Internet des Objets (IoT), des télécommunications, de la logique reprogrammable et des composants IA, soulignent les directeurs du PEPR Spin, Lucian Prejbeanu et Vincent Cros, des domaines répondant à des enjeux forts de souveraineté en technologie de l'information, de la sécurité, de l'énergie et de la santé, ou bien sur les marchés de la défense, du nucléaire ou encore de l'aérospatial." ■

1) - Programmes et équipements prioritaires de recherche.

Lire dans ce numéro le dossier
"Le CEA-Irig : fabrique de savoirs".



Dans le service Spintec : un dispositif expérimental d'étude des oscillateurs spintroniques pour les applications de type communication intelligente.



© SPARTAN SPACE

Un habitat gonflable "made in France" pour coloniser la Lune.

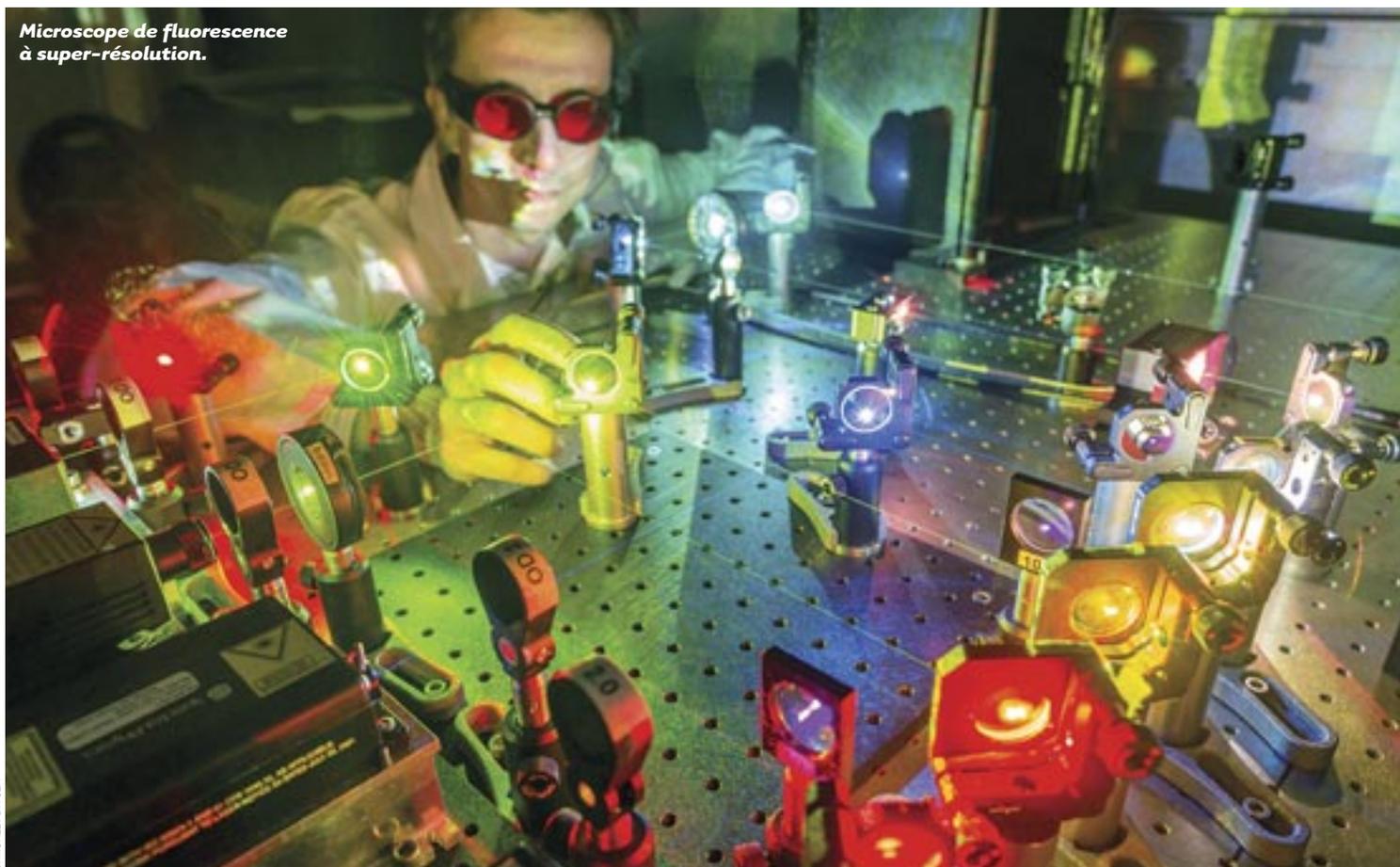
Objectif Lune

EuroHab, l'habitat lunaire conçu pour être installé sur l'alunisseur EL3 de l'Agence spatiale européenne, est le fruit d'une collaboration entre la start-up Spartan Space, le CEA Grenoble et Air Liquide. Né à Grenoble, le prototype Eurohab est une structure gonflable et mobile qui pourrait accueillir des scientifiques et astronautes pour de courts séjours sur la Lune. "Le refuge serait acheminé par un véhicule téléopéré. Autonome, EuroHab pourrait ensuite être déployé automatiquement, en seulement quelques heures, et prépositionné sur le sol lunaire avant l'arrivée des équipes. Ce refuge leur permettrait de s'éloigner de la base de vie principale pour quelques jours afin de mener à bien leurs activités sur le sol lunaire", présente Philippe Watteau, directeur de l'innovation à la DRT du CEA et directeur de Y.SPOT, centre d'innovation ouverte et collaborative. Cet habitat à la pointe de l'innovation resterait de façon permanente sur la Lune. "EuroHab pourrait être loué à la Nasa ou à l'ESA, un peu comme un Airbnb sur la Lune !", ajoute Peter Weiss, fondateur de la start-up marseillaise Spartan Space, qui ambitionne une mise en service pour 2030. Le CEA réfléchit avec Spartan Space à différentes solutions permettant de garantir l'autonomie énergétique du refuge, comme l'intégration, par exemple, de panneaux photovoltaïques souples haute performance directement sur la structure gonflable, le recours au vecteur hydrogène (amené soit par l'équipage, soit produit sur place par électrolyse via une technologie de pile à combustible d'Air Liquide) ainsi qu'un système de gestion optimisée de l'énergie. Sont en cours de réflexion : une approche système couplant capteurs et logiciels ainsi que l'usage de procédés de fabrication additive, par exemple à base de matières localement sourcées telles que le régolithe lunaire, afin d'assurer la production de pièces pour la maintenance de l'habitat. Philippe Watteau complète : "Mobilisées pour guider l'innovation par les usages, d'autres équipes du CEA expertes en design, usages, ergonomie, prospective, etc. et regroupées au sein de Y.SPOT, challengeront ces possibles développements et le projet en général pour offrir des pistes de recherche et d'applications complémentaires aux solutions technologiques déjà imaginées." ■

Le CEA-Irig : fabrique de savoirs

Fort de ces 1 100 personnels, le CEA-Irig, institut de la direction de la Recherche Fondamentale du CEA couvre un large champ de recherches théoriques et expérimentales dans les domaines de la physique, la chimie, la biologie et l'instrumentation. La diversité de ses dix services, qui sont des unités mixtes de recherche réparties dans cinq départements, lui permet de se positionner sur quatre grands piliers thématiques : Biologie-Santé, Physique-Numérique, Énergie-Environnement et Cryotechnologie. L'ensemble de ses recherches et développements s'appuie sur un parc de plateformes de recherche exceptionnel. Certaines étant des Infrastructures de Recherche nationales (IR) au service de la communauté française mais aussi européenne avec les lignes françaises de lumière et de neutrons de l'ESRF et de l'ILL (F-CRG: French Collaborative Research Group). Le CEA-Irig est une "fabrique de savoirs et de connaissances" mais aussi un lieu d'innovation pour accompagner les transitions sociétales (Numérique, Santé et Énergie). Le journal "Science et Recherches" a retenu quelques-uns des résultats et projets emblématiques de l'Institut essentiellement sur les domaines de la physique et de la cryotechnologie.

Microscope de fluorescence à super-résolution.



D. MOREL / DR-CEA



Page
6

> CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

Ils étudient une nanoparticule de platine pendant qu'elle fonctionne

C. ARGOUD / ESRF



A. DELOS / DR CEA

Page
7

> SPINTRONIQUE DU FUTUR

Fabriquer des millefeuilles cristallins magnétiques



Page
8

> SPINTRONIQUE

Les défis de l'électronique du futur

A. AUBERT / DR CEA



X. JEHL / DR CEA

Page
10

> PHYSIQUE

Un nouveau pas en avant de l'informatique quantique



Page
12

> PHYSIQUE

Une avancée pour la photonique sur silicium !

CEA-IRIG



A. DELOS / DR CEA

Page
13

> PHYSIQUE

MicroLED UV : les nanofils nous éclairent !



Page
14

> NANOMATÉRIAUX

Les mille et un usages du quantum dot

A. DELOS / DR CEA



A. DELOS / DR CEA

Page
16

> INSTRUMENTS DE RECHERCHE

Les chercheurs en RMN accèdent aux ultra-basses températures



Page
18

> CRYOTECHNOLOGIES

Des injecteurs de glaçons cryogéniques

A. DELOS / DR CEA



Page
20

> CRYOTECHNOLOGIES

Avec LiteBIRD, sonder les origines de l'univers

A. DELOS / DR CEA



Page
22

> DIAGNOSTICS PRÉCOCES

Un nez électronique à base de biomatériaux

A. DELOS / DR CEA

> CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

Ils étudient une nanoparticule de platine pendant qu'elle fonctionne

Quand physique et électrochimie se rencontrent autour de problématiques énergétiques, les avancées sont au rendez-vous.

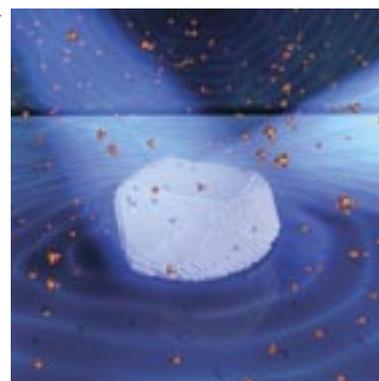
Première mondiale : des chercheurs du CEA-Irig et du CNRS ont mesuré grâce au rayonnement synchrotron de l'ESRF les déformations d'une nanoparticule unique de platine dans une solution électrochimique, afin de comprendre les propriétés de ce matériau, notamment utilisé comme catalyseur dans les piles à combustible et les électrolyseurs de l'eau. Quand physique et électrochimie se rencontrent autour de problématiques énergétiques, les avancées sont au rendez-vous. *"Contrairement à ce qui était souvent admis, la déformation induite par les réactions catalytiques se propage de façon très hétérogène dans une nanoparticule et opère dans tout son volume, et pas seulement à sa surface"*, annoncent Marie-Ingrid Richard et Clément Atlan, respectivement physicienne et thésard au service de Modélisation et

d'Exploration des Matériaux (MEM) du CEA-Irig. Dans le cadre d'un contrat ERC (Conseil européen de la Recherche), ils sont parvenus à étudier une nanoparticule unique de platine pendant qu'elle fonctionne, *"ce qui n'avait jamais été fait auparavant dans un milieu liquide"*, ajoutent-ils.

Prouesse grenobloise

La déformation d'une particule est intimement liée à l'activité catalytique et influe donc directement sur la vitesse de la réaction qu'elle catalyse. La prouesse des chercheurs grenoblois, conjointement avec le CNRS, est d'avoir pu la mesurer et ainsi permettre d'améliorer la performance des nanocatalyseurs, notamment dans les piles à combustible et les électrolyseurs de l'eau. Les nanoparticules présentent un avantage significatif par rapport aux matériaux massifs : leur taille nanométrique augmente considérablement les surfaces de contact pour accroître leur activité et leur sélectivité catalytique. Cela permet de réaliser des procédés chimiques en utilisant moins de réactifs, de réduire la consommation énergétique, et donc de baisser les coûts. Cependant, ces particules étant très complexes, il n'avait

Vue artistique des facettes d'une nanoparticule de platine.



C. ATLAN / C. CHATELIER / DR/CEA

Montage d'un échantillon sur la ligne de lumière ID01 du synchrotron européen (ESRF). De gauche à droite : des chercheurs du service de Modélisation et d'Exploration des Matériaux (Mem) au CEA-Irig : Michael Grimes, Corentin Chatelier, Clément Atlan, Marie-Ingrid Richard et Nikita Vostrov, chercheur à l'ESRF.

pas été possible jusque-là de les caractériser individuellement. Tout au plus avait-il été possible d'établir leur performance à l'échelle de la centaine de nanoparticules, avec une information moyenne sur leurs propriétés structurales et les contributions respectives de leurs différents sites catalytiques.

Aujourd'hui, c'est une nanoparticule de platine unique qui se révèle : sa structure 3D, sa forme, ses facettes ainsi que la distribution des déformations, via le déplacement des atomes, lors de son activité catalytique. *"Nous avons pu observer que la distribution de la déformation s'exerce de manière hétérogène, particulièrement au niveau des arêtes, coins et facettes de la particule. La deuxième découverte majeure est qu'elle dépend du potentiel électrique appliqué et qu'elle se propage dans tout le volume sous l'effet des liaisons entre les ions et la surface"*, explique Marie-Ingrid Richard, précisant que ces résultats n'auraient pu être obtenus sans l'ESRF, source de rayons X la plus puissante au monde permettant d'imager des objets et phénomènes complexes à des résolutions extrêmes. Les chercheurs poursuivent à présent des travaux théoriques en vue de synthétiser la prochaine génération de catalyseurs avec une activité, une sélectivité et une durée de vie adaptées. ■



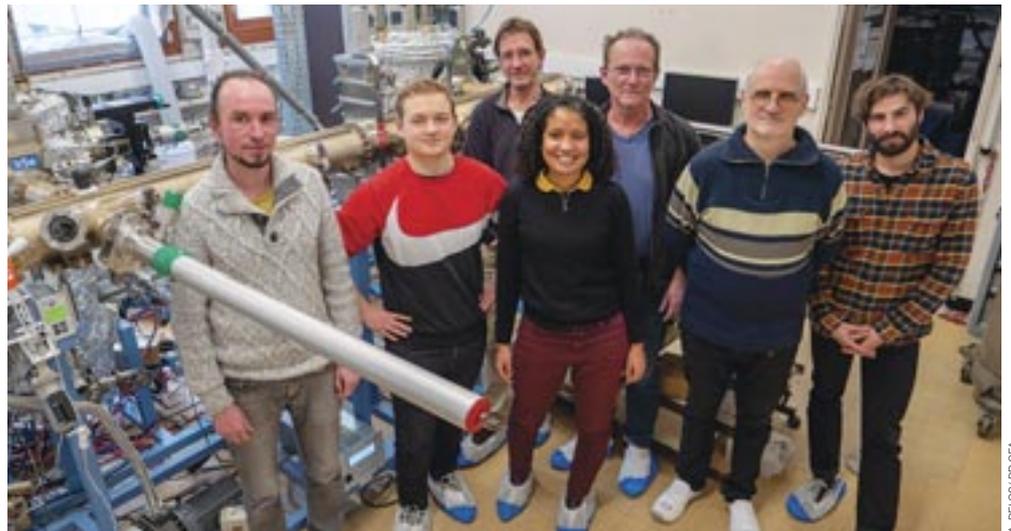
C. AFGOULD / ESRF

Fabriquer des millefeuilles cristallins magnétiques

Des chercheurs du CEA-Irig ont réalisé, par épitaxie par jet moléculaire, des millefeuilles cristallins d'un alliage de fer, germanium et tellure, de taille centimétrique, dans lesquels persiste un ordre magnétique au voisinage de la température ambiante. Une première mondiale.

Si les cristaux de van der Waals⁽¹⁾ sont connus depuis longtemps, qu'il s'agisse du graphite des mines de crayons de papier ou du graphène aux propriétés électroniques remarquables, ce n'est qu'en 2017 que des chercheurs américains ont découvert leur magnétisme. Plus exactement, un ordre magnétique à longue distance a été observé dans un matériau dit "bidimensionnel", car composé d'un seul feuillet : c'est-à-dire constitué d'une seule couche d'atomes ! L'intérêt pour les chercheurs ? Un bond en avant pour l'électronique du graphène avec la réalisation de dispositifs électroniques innovants et plus compacts qui requièrent des matériaux fonctionnels en couches ultra-minces (métaux, semi-conducteurs, supraconducteurs, etc.). Des applications futures sont aussi envisagées au cœur de la spintronique grâce à laquelle, par exemple, les ordinateurs conservent en mémoire les données stockées sans alimentation électrique.

"Jusqu'à présent, ces feuillets ultra-minces n'étaient magnétiques qu'à très basse température. Par ailleurs, ils étaient obtenus par exfoliation de cristaux massifs de différents éléments : un procédé relativement aléa-



▲ Le laboratoire Spintronique 2D, de gauche à droite : Frédéric Bonell, Cyriak Jegu, Matthieu Jamet, Isabelle Gomes de Moraes, Denis Jalabert, Alain Marty, Vincent Polewczyk devant un bâti d'épitaxie par jets moléculaires (EJM).

toire ne délivrant que des objets aux dimensions micrométriques, expose Frédéric Bonell, chargé de recherche au CNRS et chercheur au service Spintronique et Technologies des Composants (Spintec) du CEA-Irig. Or, l'intégration de ces matériaux dans des dispositifs de spintronique nécessite à la fois que leur magnétisme soit conservé à plus haute température, et qu'ils puissent être synthétisés avec des méthodes robustes et à plus grande échelle." Depuis quelques années, le laboratoire Spintronique 2D dans lequel travaille Frédéric Bonell, développe la croissance de cristaux de van der Waals par épitaxie par jets moléculaires⁽²⁾.

"Nous sommes parvenus à faire croître

Image obtenue par microscopie électronique d'un composé Fe_5GeTe_2 - fer (Fe), germanium (Ge) et tellure (Te), constitué de quatre couches de van der Waals, réalisé par Épitaxie par Jets Moléculaires (EJM). Les trois lignes d'interface atomique (gap de van der Waals) sont remarquablement parfaites.



sur du saphir des couches ultra-minces magnétiques de Fe_5GeTe_2 - fer (Fe), germanium (Ge) et tellure (Te), à haute température de Curie⁽³⁾ et ce sur de grandes surfaces, ce qui n'avait jamais été réalisé auparavant."

Le procédé hautement contrôlable a permis au laboratoire Spintronique 2D de réaliser des feuillets à l'échelle du centimètre carré dont l'uniformité et la parfaite cristallinité ont été confirmées par des techniques de caractérisation structurale et chimique. Cette avancée, qui montre que même dans des films extrêmement minces l'ordre magnétique persiste à une température proche de celle ambiante, est une prouesse. Ces travaux ouvrent la voie à la fabrication de multicouches de van der Waals plus complexes, telles que celles requises pour l'électronique et la spintronique. ■

1) Cristaux de van der Waals : couches en millefeuilles cristallins, avec des liaisons faibles entre les couches.

2) Épitaxie par jets moléculaires (EJM) : les différents éléments constituant le matériau sont évaporés sous ultraviolette et à très faible vitesse pour maîtriser la croissance. Ainsi, les couches minces croissent parfaitement cristallisées sur de grandes surfaces.

3) Température de Curie : limite haute de température pour conserver un ordre magnétique dans le matériau.

> SPINTRONIQUE

Les défis de l'électronique du futur

Comment gérer l'explosion du numérique en préservant la planète quand le stockage et l'utilisation des données devraient atteindre 20% de la consommation d'électricité mondiale en 2025. La spintronique constitue peut-être un des éléments de réponse.

Mariage entre électronique et magnétisme, la spintronique est utilisée dans de nombreux dispositifs numériques comme les mémoires magnétiques non volatiles (MRAM) ou les têtes de lecture magnéto-résistives, que l'on retrouve dans nos ordinateurs. Elle utilise le spin (moment magnétique) des électrons pour les manipuler dans les circuits. La spintronique, ou électronique de

spin, a émergé dans les années 1980. C'est en 1991 qu'elle a vu le jour au CEA, trois ans après la découverte par Albert Fert et Peter Grünberg du phénomène dit de "magnétorésistance géante" qui leur valut le prix Nobel de physique en 2007. Après quelques années de recherches expérimentales et théoriques, Spintec a été créé en 2002 par le CEA, le CNRS Grenoble et l'Université Grenoble Alpes (UGA), avec douze chercheurs. Cette structure a notamment contribué à l'émergence des mémoires MRAM. En vingt ans, elle a déposé plus de quatre-vingts brevets, et essaimé dans plusieurs start-up telles que Crocus Technology (Allegro Microsystems depuis 2023) ou Hprobe. Spintec compte aujourd'hui une centaine de personnes.

L'usage de la spintronique s'illustre donc notamment dans les mémoires où ses avantages s'incarnent dans la vitesse d'écriture (jusqu'à 0,3 nanoseconde, soit 1 000 à 100 000 fois plus rapide qu'une mémoire flash), et où la faible tension utilisée permet d'être 400 fois plus économe en énergie

qu'une mémoire flash lors de l'écriture. Mais d'autres applications sont concernées comme les capteurs de champ magnétique, très utilisés dans les secteurs de l'automobile, la robotique, les biotechnologies et le biomédical. Les recherches profiteront à terme à d'autres domaines comme le calcul dans la mémoire, la cybersécurité, les télécommunications, les data centers et l'intelligence artificielle. Cette discipline devenue incontournable est inscrite dans les stratégies d'accélération du plan "France Relance 2030".

La synapse spintronique entre en scène

À la différence de l'électronique conventionnelle, la spintronique (ou électronique de spin) utilise donc le spin des électrons pour la détection, le stockage, le transport et le traitement d'informations.

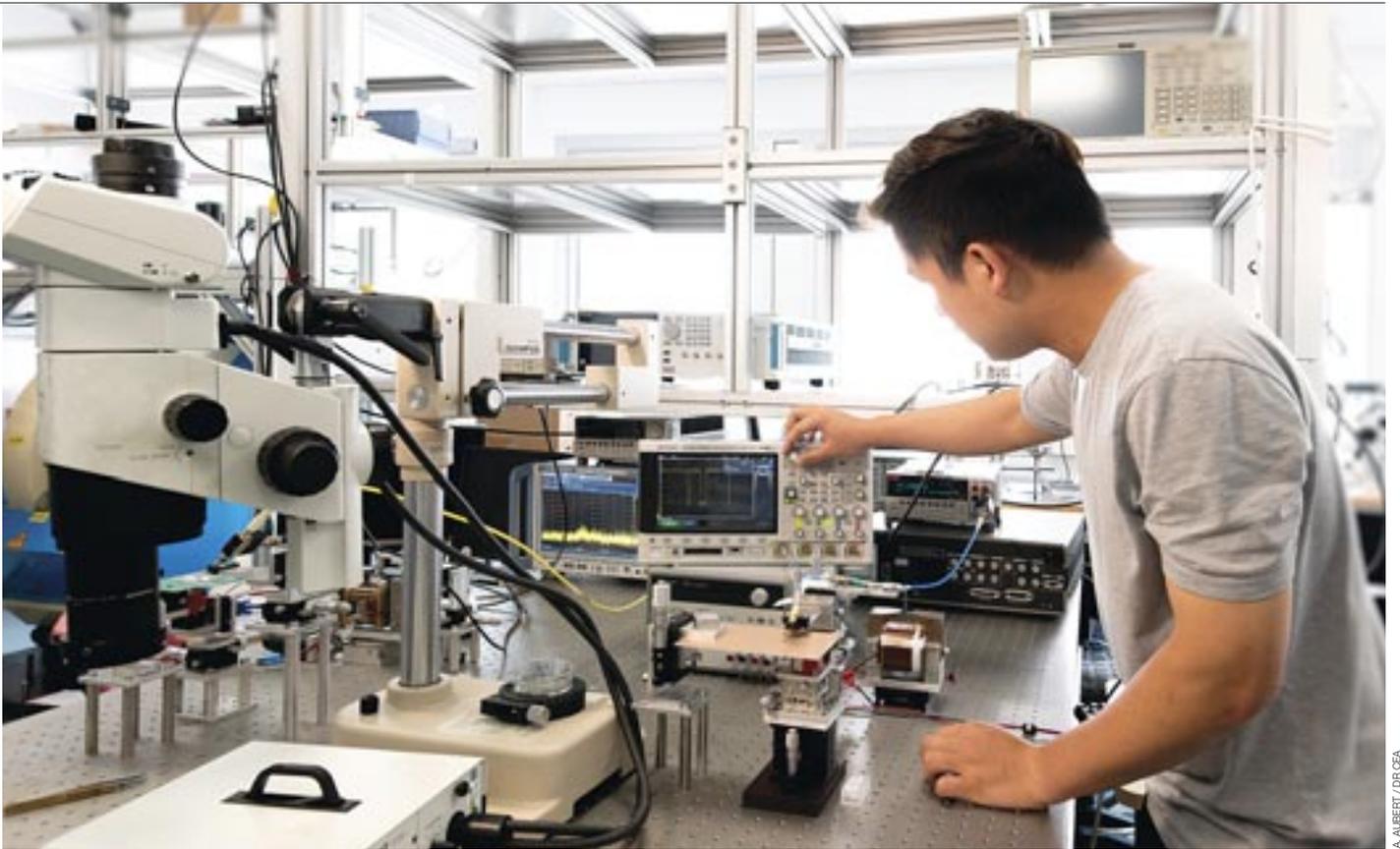
Les chercheurs du CEA-Irig ont développé un nouveau type de memristor (memory-resistor) magnétique compact basé sur la variation de la conductivité d'une jonction tunnel magnétique⁽¹⁾ de taille nanométrique. Techniquement, dans le memristor, l'aimantation de la couche libre peut tourner et prendre différentes orientations, ce qui génère plusieurs valeurs possibles de résistance. De plus, ces valeurs dépendent du sens du courant électrique qui a traversé la jonction lors de la phase d'apprentissage, ce qui rappelle le fonctionnement d'une synapse (avec son potentiel excitateur ou inhibiteur).

Une première étape a ainsi été franchie vers la réalisation d'un circuit neuromorphique spintronique dont le fonctionnement vise à imiter le fonctionnement d'une synapse, et par extension, du cerveau. Cette première étape ouvre la voie au calcul neuromorphique, "pure" technologie bio-inspirée.

De gauche à droite : Stéphane Auffret, Liliana Prejbeanu, Louis Farcis, Ricardo Sousa, Guillaume Prenat, chercheurs à Spintec.



A. DELLOS / DR-CEA



A. ALBERT / DR. CEA

Et les derniers développements de la recherche pointent l'importance du nouvel enjeu de la spintronique avec le calcul des réseaux de neurones. Tout l'art consiste désormais à manipuler dans des circuits le moment magnétique des électrons. Dans cette optique, des chercheurs de Spintec proposent une architecture parallèle innovante dans laquelle l'information est stockée et calculée dans un même bloc sans affecter la précision de l'intelligence artificielle.

Réseau de neurones : l'intelligence artificielle en marche

Dans ce contexte, la conception classique des ordinateurs où le processeur et la mémoire sont séparés (architecture type Von-Neumann) n'apparaît plus adaptée même si les réseaux de neurones convolutifs⁽²⁾ sont efficaces pour réaliser certaines tâches comme la reconnaissance d'images ou de textes. C'est pourquoi les chercheurs du CEA-Irig ont recours aux dispositifs spintroniques qui permettent une implémentation parallèle des réseaux

dans laquelle le calcul et le stockage sont intégrés dans un même bloc. Reste que la variabilité intrinsèque des memristors affecte notamment la précision du calcul. Pour contourner les difficultés, les chercheurs ont testé une architecture combinant deux concepts. Le premier est celui du réseau d'ensemble, c'est-à-dire que le réseau global est remplacé par plusieurs petits réseaux moins précis mais

▲ **Salle Hyperfréquence. Vue globale d'un banc de mesures électriques sous pointes pour étudier les jonctions tunnel superparamagnétiques.**



A. ALBERT / DR. CEA

► **Salle Hyperfréquence. Zoom sur le porte échantillon d'un microscope permettant la mesure de systèmes spintroniques et magnétiques.**

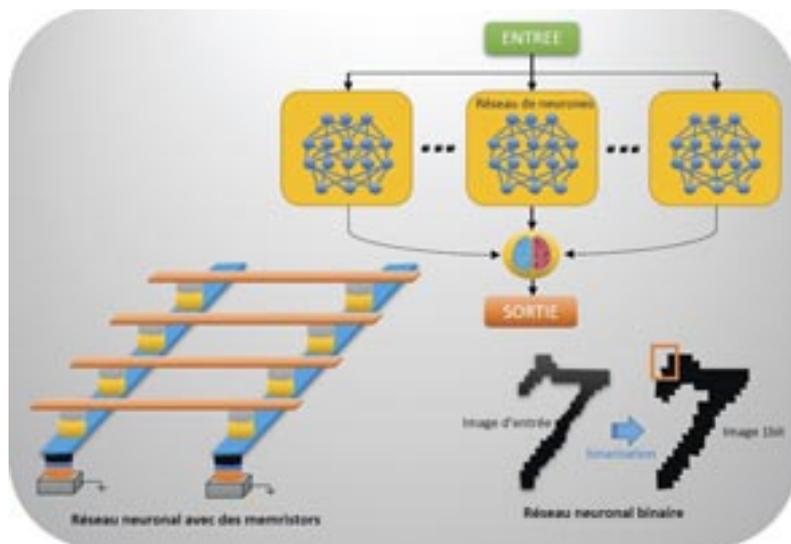
beaucoup plus simples, qui sont entraînés avec différents échantillons extraits du même ensemble de données. Ces résultats obtenus sont ensuite comparés pour produire une décision dont la précision est comparable à celle d'un réseau unique. Le second est celui du réseau binaire dans lequel les poids synaptiques prennent uniquement deux valeurs, contrairement aux réseaux classiques, dont les poids varient de manière quasiment continue.

"Les deux concepts se combinent parfaitement avec l'utilisation de dispositifs spintroniques puisque le réseau d'ensemble permet de contrecarrer les pertes de précision du réseau binaire et l'impact des variations de procédé sur le calcul analogique", annonce Guillaume Prenat, chercheur CEA à Spintec. L'expérience montre en effet que la perte de précision est relativement faible ainsi qu'une forte diminution du coût matériel : le nombre de neurones est réduit de 92 % et celui des synapses de 95 % pour une précision semblable à celle d'un seul réseau convolutif équivalent. De plus, une économie de 95 % du nombre de cycles d'horloge et de 97 % du nombre d'accès à la mémoire est observée. Et, cerise

(Suite page 10)

Un nouveau pas

La physique quantique appliquée aux techniques de l'information promet une révolution en termes de capacité de calcul. Dans ce domaine, les chercheurs du CEA-Irig poussent les limites des bits quantiques de spin en silicium.



▲ **Architecture des réseaux de neurones intégrant des memristors spintroniques (à gauche), avec un réseau de neurones d'ensemble (en haut) combiné avec un réseau de neurones binaire (à droite).**

sur le gâteau, l'utilisation de *dispositifs à couplage spin-orbite* (3) permet de diminuer encore de trois ordres de grandeur la consommation énergétique grâce à la réduction des courants.

Bienvenue au neurone artificiel spintronique !

Ce n'est pas tout. Dans le cadre de travaux cités plus haut, des chercheurs du CEA-Irig ont montré que les jonctions tunnel peuvent être utilisées comme "memristor" (memory-resistor), c'est-à-dire un composant dont la résistance dépend de l'histoire du courant qui le traverse, et qui mime le fonctionnement d'une synapse, un composant clé d'un futur circuit neuromorphique, rapide et économe en énergie. Dans le domaine de l'intelligence artificielle, l'utilisation des réseaux de neurones artificiels inspirés du fonctionnement de notre cerveau a été identifiée comme une voie prometteuse pour réduire l'énergie consommée par les algorithmes qui traitent l'information. Cependant, il n'existait pas jusqu'à présent de réseau neuronal intégrant des composants spintroniques compacts et économes en énergie. Dans une nouvelle étude, les physiciens ont ainsi questionné le potentiel de ces jonctions tunnel magnétiques pour se matérialiser en neurone artificiel à impulsions, destiné à s'intégrer à un réseau neuronal.

Le neurone artificiel spintronique développé émet des impulsions électriques commandées par l'application d'une tension. La fréquence de ces impulsions (reliées à la résistance de la jonction) dépend de l'amplitude du courant continu circulant dans la jonction.

Ce dispositif présente plusieurs avantages, notamment dans la perspective de son intégration dans un réseau neuronal dense. Il fonctionne sans champ magnétique et n'est pas sensible aux perturbations magnétiques parasites, sa taille est inférieure à 100 nm et sa consommation d'énergie est faible (environ 10^{-11} J/impulsion) (4).

"Grâce aux multiples fonctions mentionnées (mémoire, capteur, synapse, neurone), les jonctions tunnel magnétiques peuvent être vues comme des pièces de Légo® nanométriques, des briques de toutes les couleurs pour concevoir les dispositifs du futur, rapides et efficaces", conclut Liliana Buda-Prejbeanu, professeure des universités à Grenoble (UGA/INP/Phelma), rattachée à Spintec. ■

1) Jonction tunnel magnétique: deux couches minces ferromagnétiques séparées par une barrière isolante.

2) Convolutifs qui utilisent la convolution: c'est-à-dire une opération binaire sur les fonctions.

3) Dispositifs à couplage spin-orbite: ce sont des dispositifs électriques dont le fonctionnement s'appuie sur l'interaction mutuelle entre le spin de l'électron et de son mouvement.

4) 10^{-11} J/impulsion: il faut 10 billionièmes de Joule pour générer une impulsion.

La promesse de l'informatique quantique réside dans sa capacité potentielle à résoudre des problèmes beaucoup plus rapidement que les ordinateurs classiques. Dans la course technologique actuelle, différents supports physiques sont en compétition pour encoder l'information quantique. Leur point commun ? Ils doivent former des systèmes quantiques à deux niveaux d'énergie, les fameux bits quantiques ou qubits. Contrairement au bit classique qui ne peut prendre que deux valeurs (0 ou 1), le qubit peut être placé dans une superposition des deux états comme par exemple 0+1 ou 0-1. C'est ce nouvel encodage de l'information qui est à l'origine des promesses des ordinateurs quantiques.

Une technologie prometteuse

Pour réaliser un qubit, on peut utiliser un électron unique (ou son *alter ego* chargé positivement: le trou) dans un semi-conducteur comme le silicium ou le germanium. On encodera alors le qubit sur l'état de spin de l'électron. Le spin n'a pas d'équivalent en physique classique mais on peut l'imaginer

De gauche à droite, Simon Zihlmann et Romain Maurand réalisent les dernières connexions électriques qui vont permettre de mesurer un qubit de spin dans leur cryostat (visible en arrière-plan) à une température de 0,007 degré au-dessus du zéro absolu.



en avant de l'informatique quantique



FRANÇOIS LERLOCH / LATEQS

comme une petite boussole quantique. Lorsque l'aiguille de la boussole pointe vers le bas on parle de spin bas (↓) définissant le qubit dans l'état 0. À l'inverse, l'aiguille vers le haut définira l'état 1 dit de spin haut (↑).

Les spins d'électrons ou les spins de trous sont des candidats prometteurs car ils peuvent être isolés dans des dispositifs similaires aux transistors silicium comme les chercheurs du CEA-Irig et du CEA-Leti l'ont démontré en 2016. Ainsi la fabrication de ces qubits est compatible avec les procédés industriels de la micro-électronique. De petite taille, de l'ordre de la dizaine de nanomètres, les qubits de spin pourraient ainsi être intégrés par millions, voire milliards, sur une même puce à l'image des millions de transistors au cœur des processeurs de nos ordinateurs actuels.

Une superposition fragile

Comme les bits, les qubits doivent pouvoir être initialisés, lus et manipulés, mais surtout ils doivent pouvoir être gardés en état de superposition. Or, cette superposition est fragile. En effet, le moindre bruit dans l'environnement du qubit peut détruire son état superposé. On parle alors de décohérence, le cauchemar de l'information quantique ! À l'heure actuelle, aucun qubit ne possède une cohérence suffisante pour exploiter les promesses des algorithmes quantiques (qui pour la plupart se basent sur des qubits parfaits). C'est ici que la recherche fondamentale entre en jeu. En essayant de comprendre la physique des systèmes quantiques, les chercheurs essaient de modéliser les effets de décohérence et

de trouver des stratégies pour réaliser de meilleurs qubits.

Une configuration idéale

Récemment, des chercheurs de l'Université de technologie de Delft (Pays-Bas) ont développé un processeur à quatre qubits de trous en germanium, une prouesse saluée par toute la communauté des qubits de spin. Cependant, dans leur expérience (comme dans les premières expériences du CEA), le tueur de cohérence est le bruit électrique. En contrôlant finement un spin unique de trou dans le silicium, des chercheurs du laboratoire de Transport Électronique Quantique et Supraconductivité (Lateqs) du CEA-Irig viennent de faire la démonstration qu'il existe une configuration optimale pour laquelle le bruit électrique n'est plus capable d'induire de la décohérence.

▲
Les chercheurs du laboratoire Lateqs explorent les propriétés électroniques des matériaux et dispositifs quantiques à très basse température.

"C'était incroyable, lorsque l'on appliquait le champ magnétique dans une direction bien précise, on avait une explosion de la cohérence de notre qubit", s'enthousiasme, Romain Maurand, chercheur au Lateqs. Cependant, il fallait comprendre cet effet inattendu. Ainsi, alliant théorie et expérience, les physiciens ont affiné leur modèle et "pour la première fois les réponses expérimentales du spin mesuré au Lateqs étaient en parfaite adéquation avec nos prédictions théoriques", commente Yann-Michel Niquet, chercheur au laboratoire de Simulation atomistique (L_SIM)⁽¹⁾.

Les chercheurs du CEA-Irig ont ainsi démontré qu'il existait une configuration optimale permettant aux qubits de spin (de trou) de se cacher du bruit et ainsi de garder l'information quantique quasiment 100 fois plus longtemps que dans les premières expériences faites au CEA. Les chercheurs poursuivent l'exploration de cette configuration idéale et essaient de déterminer si elle pourrait être utilisée sur plusieurs qubits simultanément ou dans d'autres matériaux comme par exemple le germanium. ■

1) L'objectif du laboratoire Simulation Atomistique (L_SIM) du Mem est de simuler et de prédire la structure et les propriétés des nanomatériaux. Leurs propriétés sont régies par leur structure atomique.

Électrons, spins, spins de trou... tout comprendre sur les qubits de spin

Les électrons sont des particules élémentaires chargées négativement. Ils font partie des briques de base des atomes et forment le courant électrique quand ils se déplacent. Ce sont ces charges négatives que les dispositifs de la microélectronique conventionnelle, comme le transistor, manipulent. Les électrons possèdent également une autre propriété intéressante, appelée **spin**. Dans les matériaux semi-conducteurs comme le silicium, le courant électrique provient du déplacement des électrons ou de leurs **lacunes**, on parle alors d'un **courant de trous**. Comme pour les électrons, les **trous** possèdent une propriété de **spin**. Le spin est une propriété interne des particules. Cette **grandeur quantique** n'a pas d'équivalent classique mais est assimilable à un moment magnétique intrinsèque à la particule, comme si l'électron était un minuscule aimant en rotation sur lui-même. De la même façon qu'un aimant possède un pôle Nord et un pôle Sud, le spin possède une "orientation", vers le haut (up) ou vers le bas (down). Les chercheurs du CEA-Irig ont montré que les spins des électrons ou de leurs lacunes (trous) sont des candidats prometteurs pour encoder l'information quantique car ils peuvent être isolés dans des **boîtes quantiques** de silicium, grâce à une technologie compatible avec les procédés industriels de la micro-électronique. ■

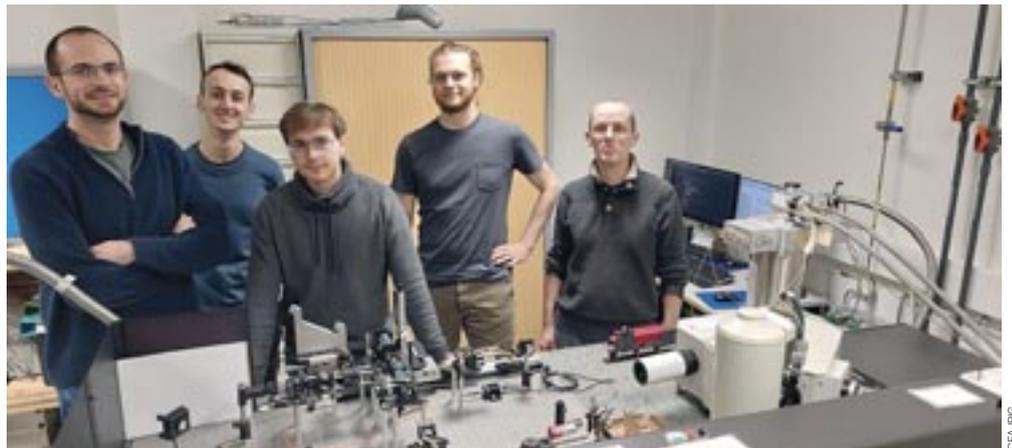
> PHYSIQUE

Une avancée prometteuse pour la photonique sur silicium !

Avec une première émission laser d'un alliage germanium-étain à température ambiante, les physiciens du CEA-Irig contribuent à la révolution de la photonique sur silicium.

Depuis le début des années 2010, la photonique sur silicium est devenue une réalité industrielle d'un intérêt constant. Compatible avec les technologies CMOS de la microélectronique, c'est désormais une quête du Graal pour des communications optiques intégrées sur puce, assorties d'un gain substantiel en vitesse et en consommation énergétique.

C'est dans ce contexte que des chercheurs du service Photonique, électronique et ingénierie quantiques (Pheliqs) du CEA-Irig, en collaboration avec le CEA-Leti et le Centre de nanosciences et de nanotechnologies (C2N) de l'Université Paris-Saclay, ont produit la première émission laser d'un alliage germanium-étain à température ambiante. Une avancée qui s'annonce prometteuse pour la photonique sur silicium ! ⁽¹⁾ Car, à la base, le silicium, du fait de ses propriétés électroniques, n'est pas un matériau émetteur de lumière comme les semi-conducteurs



III-V (AsGa et InP) ⁽²⁾. Pour contourner cette difficulté, les physiciens ont donc dû plancher pendant plusieurs années sur un matériau alternatif, intégrable sur silicium et potentiellement émetteur de lumière à température ambiante : un alliage de germanium.

Le défi de l'énergie et de la chaleur

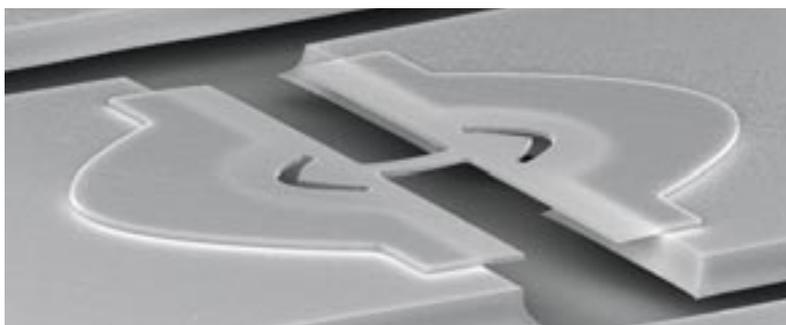
Chronologie des faits : en 2015, les chercheurs incorporent 12 % d'étain au germanium et obtiennent pour la première fois une structure atomique émettrice de lumière laser mais qui requiert une température cryogénique (90 K). En 2018 : les physiciens du CEA-Irig produisent une émission en infrarouge moyen à 230 K. En 2019 : l'émission laser est étendue sur une très large gamme de fréquence, à une température proche de l'ambiante (273 K,

▲
De gauche à droite: Simone Assali, Baptiste Lefaucher, Théophile Willoquet, Paul Goulain, Vincent Calvo, chercheurs au laboratoire Sinaps (Silicium Nanoélectronique Photonique et Structures).

◀
Image MEB (Microscope à balayage) d'une microcavité suspendue et en tension réalisée en alliage de germanium-étain (GeSn) pour le contrôle de la longueur d'onde d'émission laser.

soit 0°C). Avec leurs partenaires, les chercheurs du CEA-Irig ont, cette fois, optimisé l'architecture de la cavité laser. La température la plus haute du régime laser s'établit désormais à 32°C (au lieu de 0°C). "En réalisant cette première émission laser d'un alliage germanium-étain (GeSn) à température ambiante, ces travaux contribuent à relever les défis que sont, pour le traitement de l'information sur puce, le chauffage et la dissipation d'énergie, relèvent Nicolas Pauc et Vincent Calvo, chercheurs au laboratoire Sinaps (Silicium Nano-électronique Photonique et Structures). Ils contribuent également à la constitution d'une plate-forme scientifique et technologique idéale pour le développement des circuits de demain pour les communications optiques (télécom, 5G, 6G...), les capteurs (LiDAR, la détection de molécules biologiques et chimiques, la spectroscopie dans le proche et le moyen infrarouge, etc.) et les circuits quantiques." ■

1) L'activité spécifique de photonique GeSn sur Si (Germanium Étain sur Silicium) est conduite de longue date par des chercheurs du CEA-Irig et du CEA-Leti (Vincent Reboud, Jean-Michel Hartmann, Alexei Tchelnokov) des départements Optique et Photonique (DOPT) et Plateformes technologiques (DPFT).
2) AsGa et InP: Arséniure de gallium et phosphore d'indium.



MicroLED UV : les nanofils nous éclairent !

Les LED émettant dans l'ultraviolet (UV) connaissent un véritable essor, notamment pour leurs applications bactéricides et virucides. Les chercheurs du CEA-Irig ont réussi à miniaturiser une LED UV à l'échelle micrométrique grâce aux nanofils en nitrure de gallium (GaN).

De nouvelles diodes électroluminescentes (LED)⁽¹⁾ capables d'émettre dans l'UV sont commercialisées depuis seulement quelques années et sont employées pour diverses applications, comme la fluorescence, la polymérisation, la catalyse, le traitement des maladies de peau ou encore la désinfection UV. Les chercheurs du CEA-Irig ont récemment réussi à miniaturiser une micro-LED-UV sous la forme d'un nanofil cent fois plus fin qu'un cheveu. Les chercheurs, en collaboration avec l'Institut Néel^{(2) (3)}, ont réalisé une microLED UV avec des nanofils, comme l'explique Christophe Durand, physicien au sein du laboratoire Nanophysique et Semi-Conducteurs (NPSC) du CEA-Irig et maître de conférences à Grenoble INP : "Ces nano-

structures ont l'avantage de limiter l'impact des dislocations du matériau, d'augmenter la surface d'émission et de favoriser l'extraction du rayonnement UV." Dans le domaine des semi-conducteurs, ces travaux pionniers sur les microLED UV à nanofils constituent un progrès important dans les sources de lumière UV et dans le domaine de la nano-photonique en général. Les chercheurs du service Photonique Électronique et Ingénierie Quantiques (Pheliqs) du CEA-Irig ont pour objectif de "développer des LED UV-C à nanofils ou encore des LED UV à nanofils flexibles". Pour l'heure, les tout premiers résultats sont prometteurs et ont été présentés lors de la Conférence internationale des nitrures semi-conducteurs (ICNS), en novembre 2023, au Japon. "Ce dispositif ouvre aussi la voie à d'autres nouvelles applications, à l'horizon 2030, souligne Christophe Durand, comme des écrans à pixel UV pour la détection biologique et la photolithographie à la demande." ■

1) Une diode électroluminescente (abrégié en DEL en français, ou LED, de l'anglais : Light Emitting Diode.
2) L'Institut Néel est un laboratoire CNRS grenoblois de recherche fondamentale en physique de la matière condensée qui dispose d'un effectif de 450 personnes dont 175 chercheurs et chercheurs enseignants.
3) Projet financé avec les soutiens du programme d'Initiatives de Recherche Stratégiques (IRS) de l'Idex Université Grenoble Alpes et de l'Agence nationale de la Recherche (ANR).



L'unité de production d'Aledia à Champagner.

À l'origine d'Aledia

C'est l'expertise conjointe du CEA (Irig et Leti) qui est à l'origine d'Aledia. Créée en 2011, la start-up développe des écrans 3D à micro-diodes électroluminescentes (microLED) pour les montres connectées ou les casques de réalité augmentée, basées sur une architecture unique utilisant des nanofils de nitrure de gallium (GaN) sur silicium (WireLED™). La technologie WireLED™ est un type particulier de diodes électroluminescentes (LED) en géométrie 3D. Si le matériau reste du nitrure de gallium (GaN), sa configuration n'est plus planaire : une croissance de nanofils de GaN (dont le diamètre est inférieur au micromètre) est obtenue sur un substrat wafer classique de silicium, et l'effet LED est obtenu sur la périphérie de chaque nanofil. Son principal avantage est la production des réseaux de microLED sur des substrats silicium classiques de micro-électronique, ce qui permet l'utilisation de substrats de grande taille, la diminution des coûts, et au besoin l'intégration monolithique avec une électronique CMOS. Cette technologie est destinée aux applications d'affichage par microLED : écran plat où chaque pixel est matérialisé par une LED. Après sept années passées au sein du CEA, Aledia a construit à Échirolles en 2019 son propre bâtiment de 4 000 m² avec une ligne pilote – un investissement de 20 millions d'euro –, puis a lancé en 2020 la construction de sa future usine (50 millions d'euros) à Champagner. La salle blanche est prête à accueillir les premiers équipements avec l'objectif de démarrer la production de nanofils sur plaquettes de silicium de 200 mm pour la réalisation d'écrans à microLED. ■

Des chercheurs du laboratoire NPSC. De gauche à droite : Hussein Mohaidly, Christophe Durand, Jean Dussaud, Lucie Valéra, Jonathan Henriques, Joël Eymery, et l'équipement d'épitaxie MOCVD dédié à la croissance de LED sur des nanofils de nitrures pour la réalisation de nouveaux dispositifs photoniques visibles et UV.



> NANOMATÉRIAUX

Les mille et un usages du quantum dot

Les chercheurs du CEA-Irig ont mis au point une synthèse originale pour réaliser des quantum dots (boîtes quantiques nanométriques semi-conductrices) de phosphore d'indium de plus grande taille émettant dans le proche infrarouge. Ces quantum dots sont déjà utilisés dans nos divers écrans. Grâce à ces nouveaux matériaux, d'autres applications, notamment la conversion d'énergie solaire et l'imagerie *in vivo* sont maintenant envisageables.

Is sont minuscules, leurs dimensions se mesurent en nanomètres, soit en milliardièmes de mètre, on les appelle les quantum dots, en français "boîtes quantiques" ou plus brièvement QD. Composés de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, ces semi-conducteurs à l'échelle miniature obéissent aux lois de la physique quantique. Leurs dimensions réduites modifient profondément leurs propriétés électroniques et optiques donnant notamment lieu à une fluorescence intense dont la couleur dépend de la taille des particules.

Quand les QD voient rouge

Ce qui leur ouvre de nombreuses applications dans des secteurs industriels aussi variés que la télévision, la photonique, la conversion d'énergie ou le diagnostic médical. Pas étonnant alors que la découverte des QD ait fait l'objet du prix Nobel de Chimie 2023⁽¹⁾. Alors que jusqu'à présent, leur taille ne

dépassait pas six nanomètres, les scientifiques sont parvenus à synthétiser des boîtes quantiques de phosphore d'indium (InP), dont la taille dépasse dix nanomètres. Comme les propriétés quantiques de ces nanostructures peuvent être modulées en fonction de leur taille, les grosses particules sont capables de décaler l'émission des longueurs d'onde du spectre visible vers le proche infrarouge, ce qui représente un atout pour l'imagerie biomédicale et pour la conversion d'énergie solaire.

Une avancée pour l'imagerie biomédicale

"La recherche sur les quantum dots implique un large consortium de chercheurs au sein du CEA-Irig⁽²⁾", souligne Peter Reiss, directeur adjoint du service Systèmes Moléculaires et nanoMatériaux pour l'Énergie et la Santé (Symmes).

En bio-imagerie, les émissions dans le proche infrarouge sont particulière-

Les chercheurs travaillant sur les Quantum dots (QD) au laboratoire Step (Synthèse, Structure et Propriétés de Matériaux Fonctionnels).





CEA/IRIG

ment intéressantes car l'absorption et la diffusion de lumière par l'environnement biologique y sont fortement réduites.

"Convenablement fonctionnalisés, les QD peuvent servir à détecter des biomolécules ou permettre de les marquer afin de suivre *in vivo* leur évolution dans des milieux biologiques complexes (cellules, organismes) et d'y effectuer une analyse plus en profondeur des tissus, complète Peter Reiss. Outre les applications de sondes fluorescentes pour l'imagerie des cellules vivantes, ou comme éléments de base de nanocapteurs, on peut aussi envisager de les coupler à d'autres blocs fonctionnels dans lesquels l'ADN intervient

dans l'assemblage : nanosondes mettant en jeu le transfert d'énergie entre molécules fluorescentes ou nano-antennes plasmoniques pour la bio-imagerie et la biodétection."

Ces idées sont actuellement explorées dans une collaboration entre d'une part, les laboratoires Synthèse, Structure et Propriétés de Matériaux Fonctionnels (Step) et Chimie pour la Reconnaissance et l'Étude d'Assemblages Biologiques (Creab) du Symmes et, d'autre part, le laboratoire Nanophysique et Semi-Conducteurs (NPSC) du service Photonique Électronique et Ingénierie Quantiques (Pheliqs).

Qui plus est, ces nanoparticules, sans

▲ **Quantum dots de phosphure d'indium (InP) de taille croissante d'environ 4 à 11 nm (de gauche à droite) sous lumière UV.**

De gauche à droite sur la photo : **Alexandra Yéromina et Pierre Machut devant la sorbonne dédiée à la synthèse de quantum dots de phosphure d'indium (InP).**

métaux lourds toxiques, mieux tolérées par l'organisme, remplacent avantageusement les matériaux à base de séléniure de cadmium, ou de sulfure de plomb, depuis que l'utilisation de ces éléments toxiques a été restreinte en 2011 par la directive Européenne RoHS⁽³⁾.

A. DELOS / DR CEA



1) Le prix Nobel de chimie 2023 a été décerné à Mounji Bawendi (Massachusetts Institute of Technology, MIT, États-Unis), Louis Brus (Columbia University, États-Unis) et Alexei Ekimov (Nanocrystals Technology Inc, États-Unis) pour la découverte et la synthèse des boîtes quantiques colloïdales.

2) Ce consortium réunit des spécialistes de chimie et physique de la matière condensée et des nanostructures pour :

- la synthèse colloïdale des quantum dots (laboratoire Step du service Symmes),
- la caractérisation par microscopie électronique, diffraction des rayons X et résonance nucléaire magnétique (institut de Biologie Structurale (IBS) et le service Modélisation et Exploration des Matériaux (Mem),
- la chimie de surface pour la fonctionnalisation régio-sélective et la biochimie pour la synthèse et la purification d'ADN (laboratoire Creab du service Symmes),
- les simulations électromagnétiques et l'optique (laboratoire Nanophysique et Semi-Conducteurs (NPSC) du service Photonique Électronique et Ingénierie Quantiques (Pheliqs),

3) Réglementation européenne relative à la restriction de l'utilisation de certaines substances dangereuses (RoHS) dans les équipements électriques et électroniques.

> INSTRUMENTS DE RECHERCHE

Les chercheurs en RMN accèdent aux ultra-basses températures

Des chercheurs du CEA-Irig ont développé une instrumentation novatrice pour la "polarisation dynamique nucléaire" (DNP) et la Résonance magnétique solide haute résolution à très basse température (30 K au lieu de 100 K pour les appareils commerciaux). Leur instrument autonome en fluide cryogénique se classe en tête des prototypes préindustriels mondiaux.

La RMN permet de sonder les atomes dont le noyau possède un "spin" non nul. Elle consiste à exciter ces noyaux en présence d'un champ magnétique, avec un rayonnement radiofréquence accordé à leur résonance, et à observer l'énergie relâchée au cours de leur relaxation. "Disposer d'un instrument pour travailler à très basse température (< 100 K) ⁽¹⁾ est le vœu de nombreux chercheurs dans le domaine de la Résonance Magnétique Nucléaire (RMN), lance Gaël De Paëpe, responsable du laboratoire Résonances Magnétiques (RM) du service de Modélisation et d'Exploration des Matériaux (Mem). Cette approche RMN permet alors d'étudier avec une précision inégalée la matière, comme la structure et les défauts des systèmes amorphe ou cristallin, d'explorer la surface ou l'interface de systèmes

Les chercheurs du CEA-Irig impliqués dans le développement de la RMN et la DNP à ultra basse température. De gauche à droite, Gaël De Paëpe, Sabine Hediger, Subhradip Paul, Jean-Pierre Arnaud, Pierre Dalban-Moreynas, Éric Bouleau.

complexes, biologiques, organiques, inorganiques ou même hybrides." Les domaines d'application sont très variés, du développement de matériaux fonctionnels innovants (catalyse, stockage, biomatériaux, etc.) à la compréhension de systèmes biomoléculaires complexes (protéine fibrillaire, protéine membranaire, etc.) *in vitro* aujourd'hui et à l'avenir *in cellulo*.

La RMN permet d'acquérir des données spectrales souvent uniques, mais nécessitant parfois de très longs temps d'acquisition. La sensibilité de la RMN en phase solide peut être démultipliée grâce à la DNP et l'utilisation d'un rayonnement micro-onde bien choisi, tout en préservant des conditions de haute résolution via la rotation rapide de l'échantillon, à l'angle dit "magique" par rapport au champ magnétique. Le tout à basse température pour préserver les propriétés de relaxation électronique des agents polarisants utilisés.

Cette approche permet d'augmenter de plusieurs ordres de grandeur la sensibilité de la RMN conventionnelle à l'état solide.

Or, avec les instruments commercialisés jusqu'à présent, il n'était pas possible de travailler en dessous de 100 K, tout en contrôlant la fréquence de rotation du porte échantillon.

"En associant les compétences en cryogénie et en DNP du CEA-Irig, des chercheurs de notre institut viennent de franchir un cap décisif dans cette quête des basses températures pour la RMN haute résolution et haute sensibilité", explique Gaël De Paëpe.

"Un cryostat et une sonde spécifiquement développés pour les très basses températures sont utilisés en continu



A. DELCOS / DR CEA



A. DELOS / DR CEA

pour refroidir les flux de gaz hélium permettant de sustenter et entraîner le porte échantillon à plus de 10 000 tours par seconde et à ultra-basses températures. Les performances thermiques et fluidiques placent cet instrument de niveau préindustriel en tête des prototypes mondiaux.”

Ce succès, protégé par sept brevets internationaux, couronne une décennie de travail au cours de laquelle pas moins de sept cryostats ont été réalisés par le CEA-Irig⁽²⁾.

La dernière étape de R&D a été réalisée en partenariat avec la société BRUKER, leader mondial en instrumentation pour la RMN. Cette collaboration a permis de finaliser l'assemblage du détecteur-sonde sur site, au CEA

Grenoble. À noter, la prouesse technique pour parvenir à assembler les différents composants, minutieusement imbriqués comme des “poupées russes”, au creux de l'aimant de seulement 76 mm de diamètre : PAVLOT est un cryostat ultra-compact qui pourrait tenir dans une boîte à chaussures !

Du point de vue environnemental et économique, le fonctionnement est bien moins énergivore que le premier prototype conçu il y a quelques années par ces mêmes chercheurs. En effet, l'architecture thermique initiale qui demandait un approvisionnement quotidien en hélium liquide et coûtait quelques milliers d'euros a été remplacée par une solution à cryoréfrigérateur alimentée électriquement pour un

▲ **Vue panoramique du dispositif RMN-DNP ultra basse température développé au service Mem (Modélisation et Exploration de la Matière) et au département des Systèmes Basses Températures (DSBT) du CEA-Irig. De gauche à droite : Subhradip Paul (laboratoire RM du Mem) sous l'aimant supraconducteur (10 Tesla) intégrant la sonde RMN/DNP PAVLOT. Au second plan, la source micro-onde haute fréquence / haute puissance (gyrotron à 263 GHz). Au centre, le cryostat autonome CRYSTALS (20K) avec la ligne souple cryogénique, les deux modules “cryo-réfrigérateurs” et le module “échangeurs”. À droite, Éric Bouleau (DSBT/laboratoire Conception Cryogénique et Calculs (L3C).**

coût de quelques dizaines d'euros. Lorsqu'il est comparé au seul prototype concurrent, l'instrument SACRY-PAN-PAVLOT mis au point par les chercheurs grenoblois est cinq fois moins consommateur d'énergie. Les développements de l'instrument se poursuivent et ont dès à présent permis d'obtenir des résultats scientifiques inédits. La conception et la mise au point d'une version de type “industriel” sont en cours pour permettre un transfert technologique vers un industriel. ■

1) K: Le kelvin est une unité de température absolue (ou température thermodynamique), c'est-à-dire dont le zéro est le zéro absolu. Zéro absolu: 0 K = -273,15 °C.

2) Les chercheurs du CEA-Irig impliqués sont ceux du Mem et ceux du département des Systèmes Basses Températures (DSBT).

◀ **Vue de la sonde RMN-DNP PAVLOT développée au CEA-Irig (Collaboration Mem/RM et DSBT/L3C), de gauche à droite : Subhradip Paul, Éric Bouleau.**



A. DELOS / DR CEA

> CRYOTECHNOLOGIES POUR LA FUSION THERMONUCLÉAIRE

Des injecteurs de glaçons cryogéniques pour atténuer les "disruptions" du plasma d'ITER

Depuis près de 70 ans, les physiciens et les ingénieurs courent après le feu du soleil avec comme quête du Graal: la fusion contrôlée. C'est dans ce contexte qu'a été conçu le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) à Cadarache.

Ce réacteur est une machine expérimentale conçue pour démontrer la faisabilité scientifique et technique de l'énergie de fusion par confinement magnétique pour produire de l'électricité. ITER sera la plus grande installation de ce type au monde. Prévu à l'origine pour 2025, le premier plasma du réacteur de fusion expérimental ne devrait pas avoir lieu avant 2030.

Les réactions de fusion nécessitent un plasma à plus de cent millions de degrés et des champs magnétiques pour confiner ce plasma loin des parois. Toutefois, des instabilités (appelées "disruptions"), analogues aux éruptions solaires, peuvent apparaître durant ce confinement. Les effets des disruptions sont susceptibles d'endommager les parois de la chambre plasma ainsi que la structure mécanique des composants internes du

réacteur. Il est donc crucial de développer un système efficace d'atténuation de leurs effets.

Protéger le réacteur

Le projet DMS (Disruption Mitigation System) pour ITER propose l'injection massive de glaçons cryogéniques (Hydrogène, Deutérium, Néon) fragmentés en entrée de la chambre du plasma. Vingt-sept injecteurs de glaçons de taille centimétrique seront installés pour protéger l'installation lors de l'exploitation des plasmas de haute énergie. Dans ce contexte, le département des Systèmes Basses Températures (DSBT)⁽¹⁾ du CEA-Irig est intervenu dans le cadre d'un premier contrat de R&D, "Technology Fundamental Studies", visant à démontrer la faisabilité de la formation et l'accélération de glaçons cryogéniques de grandes dimensions (diamètre 3 centimètres ; longueur 6 centimètres ;

L'équipe technique et scientifique impliquée dans le projet ITER-DMS au DSBT.



iques contre



A. DELOS / DRF CEA

▲ Le cryostat, pièce centrale du banc d'injection de glaçons développé par le DSBT pour le projet ITER-DMS.

tes). Il a rempli avec succès les objectifs fixés par ITER : formation des glaçons en moins de trente minutes et vitesse finale de 500 mètres par seconde. Fort de cette réussite, le DSBT a remporté un second contrat pour l'étude d'un nouvel injecteur respectant cette fois les contraintes d'opération et d'intégration d'ITER. Pour cela, le CEA s'appuie sur TYFANIES, un banc de test à l'échelle 1, entièrement conçu et réalisé par le DSBT dans le cadre du premier contrat.

Ce banc de test est en cours de modification pour satisfaire les contraintes d'opération et d'intégration d'ITER. La principale évolution concerne la cellule de "condensation in-situ", une "innovation" technologique historique du DSBT adaptée aux besoins d'ITER. Cette cellule permet de fabriquer les glaçons au cœur du canon refroidi à très basses températures (4-10 K). Les glaçons sont ensuite décollés et propulsés par un lanceur à gaz. "Un injecteur de glaçons DMS est comme une énorme sarbacane capable d'accélérer les glaçons cryogéniques à plusieurs centaines de mètres par seconde !,

lance François Millet, le chef du projet. Les glaçons sont ensuite brisés sur une plaque située cinq mètres plus loin. Plusieurs caméras sont placées sur leur passage permettant leurs caractérisations en dimensions, vitesse et trajectoire."

Ces réalisations technologiques s'appuient sur le savoir-faire du DSBT en cryogénie, des simulations numériques et sont accompagnées de travaux exploratoires dans le cadre d'un Programme transversal de compétences (PTC - CEA Instrumentation) en vue de caractériser les propriétés mécaniques des glaçons cryogéniques par l'observation de leur impact sur une plaque⁽²⁾. ■

1) Le département des Systèmes Basses Températures (DSBT) est associé à l'Université Grenoble Alpes.

2) Ces travaux exploratoires sont conduits, en partenariat avec le laboratoire 3SR (Unité Mixte de Recherche - UMR 5521 associant l'Université Grenoble Alpes, le CNRS et Grenoble INP UGA), l'institut des Géosciences de l'Environnement - IGE- (Unité mixte de recherche - CNRS, Université Grenoble Alpes, Inrae, IRD et Grenoble INP UGA), l'institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique (IRFM) de la DRF au Centre CEA de Cadarache et le CEA-CESTA (Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine de la Direction des applications militaires du CEA).

Ils refroidissent les cœurs des réacteurs de fusion

Les équipes grenobloises du département des Systèmes Basses Températures (DSBT) du CEA-Irig contribuent depuis plus de trente ans au projet de réacteur de fusion expérimental ITER et à son programme de recherche et de développement complémentaire au Japon JT-60SA.

ANNÉES 1990-2005

- Conception préliminaire du système cryogénique pour le refroidissement à 4,5 K des aimants supraconducteurs et des cryopompes d'ITER.

ANNÉES 2005-2020

- Validation expérimentale dans la Station d'Essai du DSBT du lissage des charges pulsées des boucles de refroidissement des aimants supraconducteurs d'ITER et JT-60SA.
- Conception et fourniture de l'usine cryogénique pour le tokamak japonais JT-60SA (programme satellite d'ITER).
- Conception et fourniture de chaînes thermométriques et de débitmètres pour les aimants supraconducteurs d'ITER.

ANNÉES 2020-2035

- R&D pour les injecteurs de glaçons pour atténuer les disruptions des plasmas à haute énergie d'ITER.
- Participation à la mise en service du tokamak japonais JT-60SA qui a produit ses premiers plasmas fin 2023. Inauguration officielle le 1^{er} décembre 2023. ■

Le tokamak ITER et son plasma confiné magnétiquement.



© ITER

> CRYOTECHNOLOGIES POUR LE SPATIAL

Avec LiteBIRD, la cryogénie spatiale veut sonder les origines de l'univers

Apparue au moment de la formation des atomes, 380 000 ans après le big-bang, la première lumière de l'univers (ou fond diffus cosmologique) témoigne des premiers instants de l'univers. L'analyse de sa polarisation sur tout le ciel permettrait de tester des modèles "d'inflation", cette extraordinaire dilatation de l'univers, qui se serait produite seulement 10^{-38} secondes après le big-bang, il y a quatorze milliards d'années.

Afin de mieux comprendre l'histoire de notre univers, la cryogénie aux très basses températures, en l'occurrence 100 mK (-273,05 °C), est indispensable en astronomie pour refroidir les détecteurs et permettre l'observation de signaux extrêmement ténus⁽¹⁾. Pour maximiser les performances des détecteurs, tout en limitant la complexité de l'instrument, il est capital de proposer une architecture cryogénique optimisée, incluant le refroidisseur lui-même, les liens thermiques et une structure adaptée.

Les chercheurs du laboratoire Cryoréfrigérateurs et Cryogénie spatiale (LCCS) du département des Systèmes Basses Températures (DSBT) du CEA-Irig ont développé un refroidisseur, dit "SubKelvin", qui a été retenu pour équiper les deux instruments du

projet LiteBIRD (Lite satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection)⁽²⁾, un satellite international réunissant le Japon, l'Europe et les États-Unis d'Amérique. Plus précisément, le projet est mené par l'agence spatiale japonaise (Japan Aerospace Exploration Agency) responsable du satellite et du télescope basses fréquences (LFT). L'un des deux télescopes à bord (Medium and High Frequency Telescope) du satellite LiteBIRD sera fourni par les Européens, sous la responsabilité du Cnes. Enfin, le Canada et les États-Unis sont impliqués dans les deux projets au niveau des détecteurs.

De gauche à droite: Florian Bancel, Christophe Marin, Jean-Marc Duval, Thomas Prouvé, Jean-Louis Durand présentent le démonstrateur du réfrigérateur (100 mK) pour la mission Lite BIRD.

"Super" matériaux magnétocaloriques

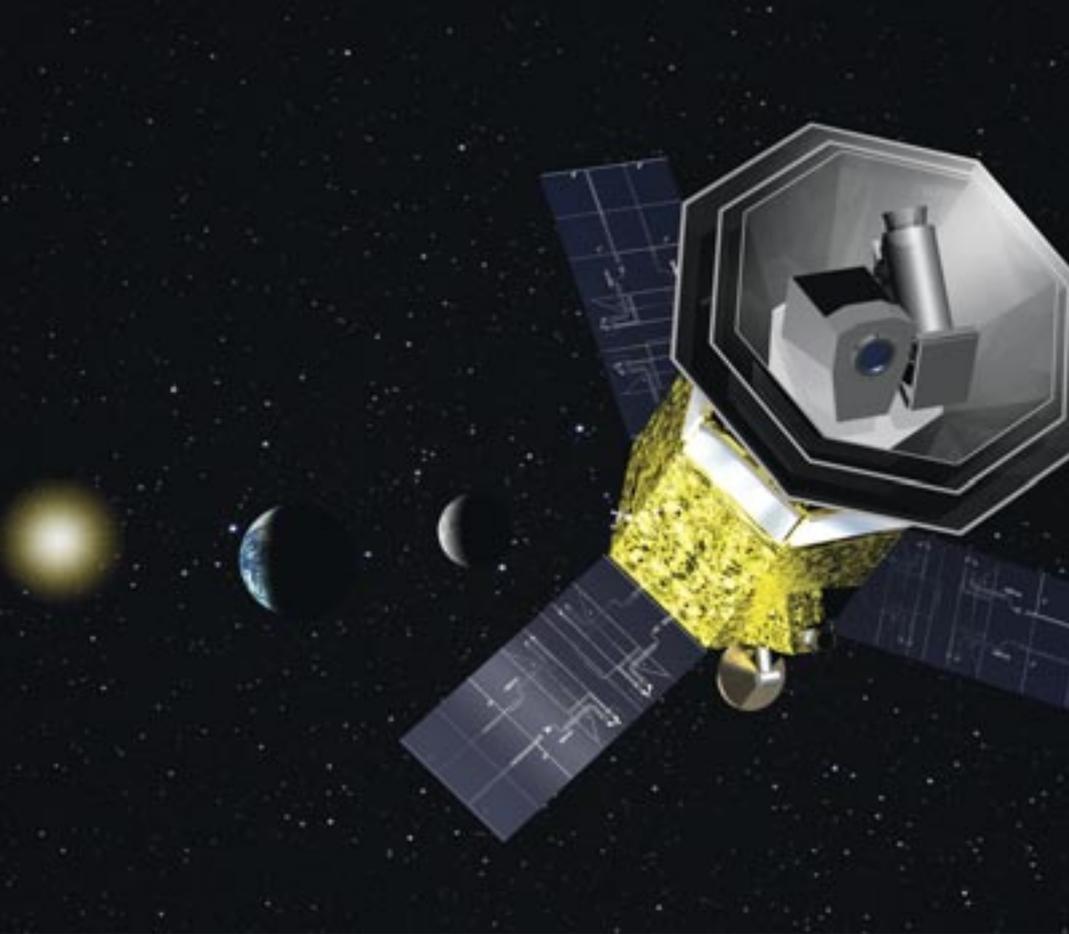
Pour sa part, le LCCS réalisera le maillon le plus froid de la chaîne de refroidissement permettant de refroidir de 2 K à 100 mK.

"Ce système comprend une succession de quatre étages de réfrigération magnétique (ou "désaimantation adiabatique"), dans lesquels le froid est produit en appliquant des variations de champ magnétique à des matériaux magnétocaloriques", détaille Jean-Marc Duval, responsable du projet au DSBT.

Les contraintes en matière de masse embarquée ont amené les chercheurs du service Photonique, Électronique et Ingénierie Quantiques (Pheliqs) à développer un nouveau matériau paramagnétique, le grenat d'ytterbium gallium, dont la capacité magnétocalorique est inégalée entre 2 K et 300 mK. L'expertise et le savoir-faire en cristallogénèse des physiciens de Pheliqs ont ainsi été décisifs pour le



A. DELOS / DR CEA



ISAS / JAXA - JAPON

développement et la production de ce refroidisseur.

Après les rapports d'études destinés à estimer la faisabilité du projet, par l'ensemble des équipes contribuant au projet LiteBIRD, celles-ci devront livrer un modèle de démonstration du réfrigérateur et des liens thermiques en 2026, puis les modèles de vol en 2030. Le lancement du satellite est quant à lui annoncé pour 2032. La mission est prévue pour durer au moins trois ans permettant la cartographie précise du signal sur l'ensemble du ciel. ■

▲ **La mission de LiteBIRD est de découvrir les origines de l'univers et comment il a commencé. À la suite du satellite Planck en 2009, le satellite japonais LiteBIRD sera lancé en 2032. Il embarquera des télescopes ultrasensibles équipés de refroidisseurs cryogéniques spécialement développés par les chercheurs du DSBT du CEA-Irig.**

- 1) Le kelvin est une unité de mesure de la température. Une température de 0°C (Celsius) correspond à une température de 273,15 K (Kelvins) et une température de 0 K correspond au zéro absolu, soit environ -273,15°C.
- 2) Satellite léger pour l'étude de la polarisation en mode B et de l'inflation à partir du fond cosmique.



A. DELOS / DR CEA

Le pôle cryogénique grenoblois

Une concentration d'acteurs et de compétences unique en France.

La cryogénie, discipline du "Grand Froid", occupe une place importante à Grenoble. Elle réunit plusieurs organismes publics de recherche et industriels. Les cryogénistes grenoblois ont, depuis plusieurs années, obtenu des résultats de tout premier plan au niveau national et international dans cette discipline. Le département des Systèmes Basses Températures (DSBT) du CEA-Irig est pionnier dans le domaine de la cryotechnologie. Fort de son expertise dans la production et l'utilisation des très basses températures (jusqu'à quelques millikelvins), ce dernier a participé à des programmes de recherche prestigieux dans des domaines variés allant de la fusion nucléaire au spatial, en passant par une implication dans le programme Laser Mégajoule (LMJ) et une contribution aux grands instruments de la Physique fondamentale (Cern/laboratoire européen pour la physique des particules). Aujourd'hui, les équipes du CEA-Irig sont toujours fortement impliquées dans les grands projets de recherche européens et internationaux (Grands instruments pour la recherche sur la fusion nucléaire, programmes spatiaux). (Lire pages 18 et 19 dans ce dossier: Cryotechnologies pour la fusion thermonucléaire). L'occasion de mettre en avant les collaborations existantes du DSBT avec le groupe Air Liquide, la PME Absolute System et l'Institut Néel du CNRS, autres acteurs majeurs du "pôle cryogénique grenoblois". ■

▲ **Tube à gaz spatial pulsé 15 Kelvins réalisé par Air Liquide en partenariat avec le CEA-Irig/DSBT et Thales Cryogenics BV sur financement Esa (Agence spatiale européenne). Ce refroidisseur est destiné aux missions d'astrophysiques spatiales. De gauche à droite, Nicolas Besson et Sylvain Martin en salle blanche du CEA-Irig.**

> DIAGNOSTICS PRÉCOCS

Un nez électronique à base de biomatériaux

La concentration et la composition de composés organiques volatils (COV) que nous expirons dans l'air change lorsque nous sommes affectés par certaines pathologies. Leur détection pourrait donc permettre de dépister ces maladies à un stade précoce. Pour cela, des chercheurs du CEA-Irig ont imaginé un nez électronique à base de nanostructures peptidiques dont les performances en matière de sensibilité se révèlent excellentes.

Inspirés du nez humain, les nez électroniques sont des outils d'avenir pour la détection et l'analyse des COV, souvent considérés comme responsables de la pollution olfactive, et dont on a découvert plus récemment qu'ils

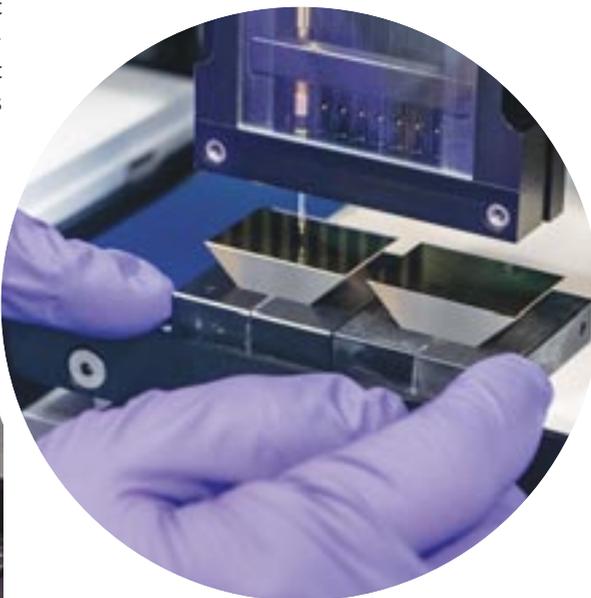


A. DELOS / DR CEA

▲ **Les chercheurs du Creab qui travaillent sur la thématique "nez électronique". De gauche à droite : Majd Khalife, Vanessa Escobar, Raphaël Mathey, Yanxia Hou-BROUTIN, Arnaud BUHOT, Nikita SAHU.**



A. DELOS / DR CEA



A. DELOS / DR CEA

◀ ▲ **Robot spotteur, un système de dépôt pour la fabrication de puces multiplexées.**

étaient des biomarqueurs de certaines maladies comme, par exemple, le cancer du poumon. Actuellement, les systèmes à base de polymères ou de matériaux inorganiques se révèlent efficaces en matière de sensibilité, mais présentent une faible sélectivité. Afin d'améliorer leurs performances, les scientifiques s'orientent vers la synthèse de biomatériaux à base de peptides. Pourquoi ce choix ? Yanxia Hou-BROUTIN, responsable du laboratoire Creab, Chimie pour la Reconnaissance et l'Étude d'Assemblage Biologique du CEA-Irig^{(1) (2)}, explique : "Tout d'abord, parce que les peptides sont des analogues des protéines qui participent à la reconnaissance des odeurs dans les nez humains, mais avec une plus grande stabilité. De plus, avec les vingt et un acides aminés qui les composent, il est possible de

concevoir un très grand nombre de peptides ayant des interactions sélectives pour les COV et donc d'offrir aux nez électroniques des meilleures performances en matière de reconnaissance et de discrimination.”

Dans ce contexte, le Creab vient de concevoir des nanostructures hybrides originales par auto-assemblage d'un peptide tensioactif. “Grâce à un processus de mise en forme simple à l'aide d'un robot spotteur, un système de dépôt pour la fabrication de puce multiplexée, nous sommes ensuite parvenus à les déposer sur puce tout en contrôlant parfaitement la morphologie des dépôts, qui joue un rôle déterminant dans la sélectivité de la détection des COV par ces nez électroniques”, confie Yanxia Hou-Broutin.

Pour la préparation et la caractérisation de ces puces, le Creab fait appel aux moyens de la Plateforme de Technologie Avancée (PTA) du CEA-Irig et de ceux de la Plateforme de nanocaractérisation (PFNC) du CEA-Leti.

“Les performances se sont révélées excellentes avec des limites de détection jamais égalées, détaille Yanxia Hou-Broutin, c'est-à-dire inférieures à une partie par milliard en volume (PPBV) pour l'acide hexanoïque et six PPBV



© JONATHAN S. WEEBANKODY

pour le phénol, deux biomarqueurs des cancers œsogastriques.”⁽³⁾

Actuellement, le laboratoire Creab continue ses recherches amont basées sur des approches biomimétiques afin d'améliorer les performances de ce nez électronique en termes de sensibilité et de sélectivité. ■

▲ **Exploration dans le monde nanoscopique.**



A. BELOS / DR CEA

▲ **Banc de gaz pour l'échantillonnage des composés organiques volatiles (COV).**

- 1) Le Creab associe des chercheurs du CEA, du CNRS et de l'Université Grenoble Alpes (UGA). Il dépend du service Systèmes Moléculaires et nanoMatériaux pour l'Energie et la Santé (Symmes).
- 2) Le peptide tensioactif (Cys-Gly-Gly-Gly-Gly-Gly-Gly) est conçu et utilisé dans cette étude. Ce produit est à destination de la recherche uniquement.
- 3) Ces travaux ont récemment été publiés dans la revue ACS Nano.

ÉCRANS Avec la généralisation des PC, tablettes, smartphones, etc., on pensait avoir tout vu en matière d'écrans. Erreur! Les technologies CEA-Leti préparent de nouvelles révolutions, comme les écrans multifonctions ou les communications optiques à base de microLED. Tout cela valait bien une ligne-programme dédiée.

La révolution ne fait que commencer

La ligne-programme Écrans, c'est cent collaborateurs dans les départements Optique et Photonique (DOPT), Composants Silicium (DCOS) et Plateformes Technologiques (DPFT), plusieurs laboratoires communs (Aledia, MicroOled...), des innovations comme les matrices microLED ultra-résolues ou le Smartpixel, présente François Templier, responsable de la nouvelle ligne-programme Écrans du CEA-Leti lancée en janvier 2023. C'est aussi le fruit d'un alignement de planètes. En 2017, nous avons

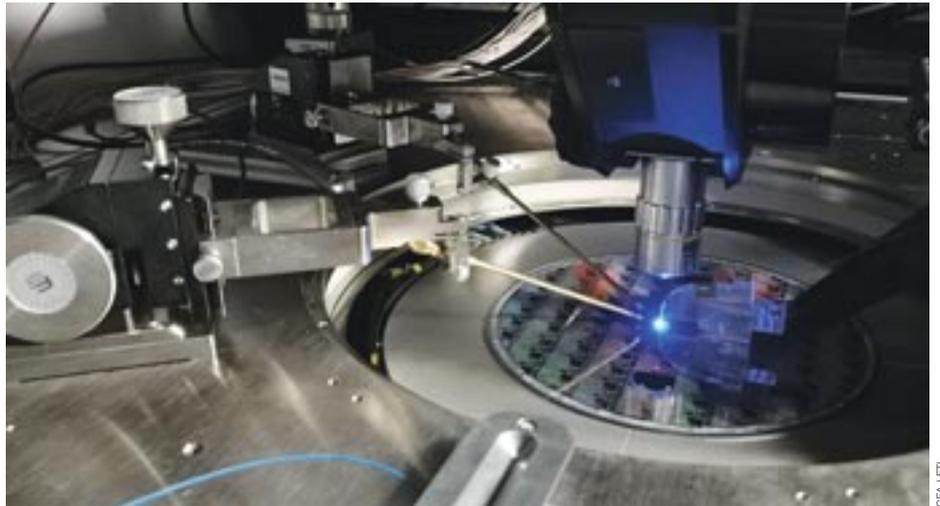


François Templier est le responsable de la ligne-programme Écrans au CEA-Leti.

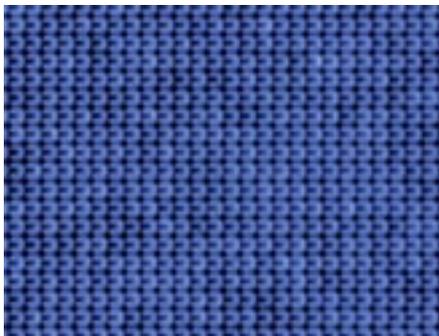
présenté un prototype à l'état de l'art qui a déclenché l'intérêt d'un des GAFAM⁽¹⁾. S'en sont suivis cinq ans de R&D commune. Notre effectif mobilisé sur les écrans est alors passé de 25 à 100 personnes!" "Nous bénéficions d'une forte dynamique, confirme

François Templier. Le marché mondial des écrans atteindra 300 milliards de dollars d'ici 2030. De plus, nous jouons sur trois tableaux: More Display, More than Display et Beyond Display." En "More Display", l'objectif est "d'améliorer encore les performances des écrans actuels grâce à nos technologies", souligne François Templier en donnant en exemple: le Smartpixel, couvert par quinze

La ligne-programme Écrans mobilise cent collaborateurs dans les départements Optique et Photonique (DOPT), Composants Silicium (DCOS) et Plateformes Technologiques (DPFT). Deux "pépites" technologiques: les matrices microLED ultra-résolues et le Smartpixel, exploité par Aledia, dont les LED sont fabriquées sur leur circuit de commande.



Équipement de caractérisation de microLED.



Matrice de microLED bleues.

brevets, dont les LED rouges, vertes et bleues sont fabriquées directement sur leur circuit de commande CMOS. Plus simple, plus rapide et performant que de reporter des millions de LED sur un support de verre TFT (transistor en couches minces) pour chaque écran. Le Smartpixel ouvre la voie au "More than display". Il n'occupe en effet que 5 à 10 microns sur un pixel d'écran qui en fait 40 (smartphones), 100 (PC) voire 300 (téléviseur). "Cet espace libre peut accueillir des capteurs ou actuateurs. L'écran devient multifonctions: capteur de température ou de lumière, mesure

du pouls et de la tension artérielle, eye tracking, reconnaissance de gestes..."

L'objectif 2024 pour le CEA-Leti est de signer un premier contrat avec un industriel. Enfin, le "Beyond Display" porte sur des communications optiques très haut débit et courte distance, basées sur des matrices de microLED. Intel s'y intéresse déjà. "Nous avons aujourd'hui quelques démonstrations de principe, précise François Templier. Mais son potentiel applicatif est immense."

Le CEA-Leti a trois axes de recherche: améliorer les performances des écrans (More Display), les doter de nouvelles fonctions (More than Display), développer des communications optiques très haut débit (Beyond Display). "L'un des enjeux est de ramener une partie de la production des écrans en Europe. Aujourd'hui, l'Asie a le monopole de la fabrication par report sur TFT, confie François Templier, or, nous apportons avec le Smartpixel une technologie CMOS réalisable chez nous et sans limites de taille qui intéresse notamment le marché des téléviseurs."

1) GAFAM, abréviation des géants du Web: Google, Apple, Facebook, Amazon et Microsoft.

