



2021 UNE ANNÉE D'ACTUALITÉS

à l'Institut de physique
du CNRS

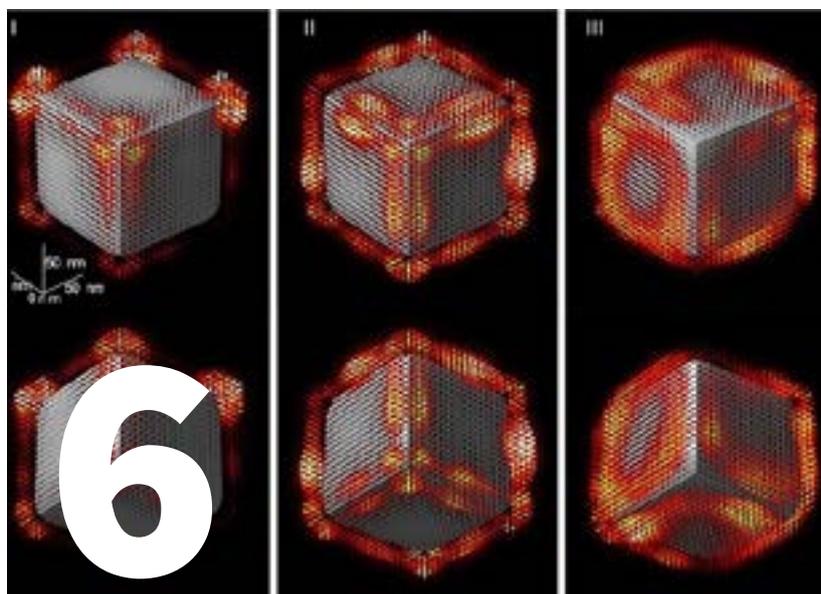
SOMMAIRE

**2021 EN
CHIFFRES**

4

ÉDITO

5

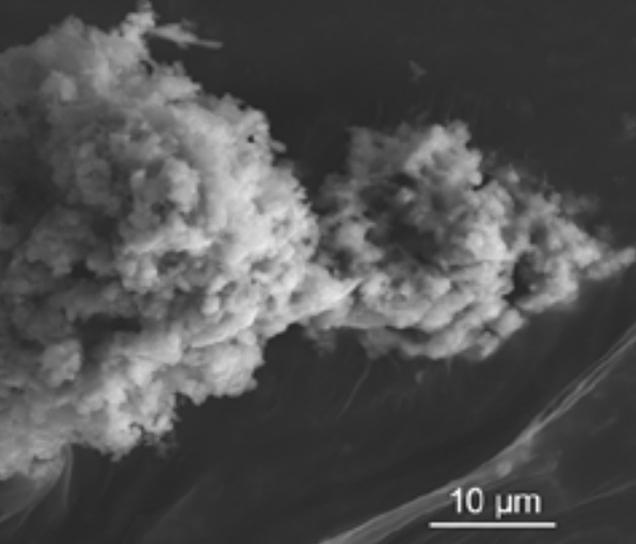


**ACTUALITÉS
SCIENTIFIQUES**

52 ACTUALITÉS INNOVATION



CONCORDIA Collection



2021 EN CHIFFRES

ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES

172 Résultats
scientifiques

17 Communiqués
de presse porteurs

2 Alertes Presse

10 Faits marquants

Issues de

40 Laboratoires différents

Venant de

15 Délégation régionales

Près de

26 500 Scientifiques concernés

6 Actualités Innovation

CNRS LE JOURNAL

5 Articles

2 Reportages vidéos

1 Dossier thématique CNRS
"Technologies quantiques"

1 Ouvrage CNRS Édition
De la mesure en toutes choses

TWITTER INP

250 Tweets

18000 abonnés

Plus de

2 000 milliers de vues

ÉDITO

Dans les laboratoires de l'Institut de physique du CNRS, les équipes de recherche étudient la matière, le rayonnement et les lois fondamentales qui régissent notre monde. L'objectif ? Étudier les sciences de la matière, depuis l'atome jusqu'au solide, le rayonnement et toutes ses interactions avec la matière pour comprendre les lois fondamentales qui régissent le monde qui nous entoure : de l'infiniment petit à l'infiniment grand sans oublier les échelles intermédiaires.

La production scientifique de nos laboratoires constitue le cœur de l'activité de recherche de l'institut. Nous avons la mission de la valoriser, dans sa richesse et sa diversité, de partager et diffuser les avancées des connaissances à différents publics et de mettre en avant l'importance du travail collectif réalisé par les équipes de recherche et les acteurs de la communication des échelles locales nationales. La production d'actualités scientifiques à partir des publications récentes que proposent les laboratoires est alors au centre de l'activité de l'équipe communication de notre institut.

Au travers de sa cinquantaine de pages, le livret « 2021 Une année d'actualités à l'Institut de physique du CNRS » rassemble et résume, comme son nom l'indique, une année d'actualités scientifiques et « innovation » issues des publications proposées et traitées à l'INP. Elles sont accompagnées des chiffres clés de la communication autour de ces actualités. Il offre donc un aperçu des avancées de la physique au CNRS en 2021. Cette liasse d'actualités met ainsi en relief les grands thèmes de recherche dans cette discipline et les travaux de l'institut en leur sein.

Cette année 2021 a aussi vu le travail produit autour des remontées d'actualités scientifiques des laboratoires récompensées par la médaille de la médiation scientifique. En effet le lauréat de l'INP Jean-Michel Courty a longtemps mis ses compétences au service de la valorisation des résultats scientifiques obtenus par les chercheurs et chercheuses de l'Institut. Il a en particulier participé à la réalisation du livret « De la publi au public » et accompagné les scientifiques dans leurs démarches de communication menant aux actualités scientifiques.

Nous remercions tous ceux qui ont contribué, par leurs propositions nombreuses et qualitatives, à la mise en place de ce panorama des activités de recherche de l'institut.



Thierry Dauxois,
Directeur de l'Institut

.....
© Cyril FRÉSILLON / CNRS Photothèque

ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES

À retrouver sur la page "Actualité" de notre site www.inp.cnrs.fr



**Reproduction du phénomène de
Zen stones au laboratoire dans un
lyophilisateur**

© *Nicolas Taberlet, Nicolas Plihon*

SIMULATIONS ET MODÉLISATIONS, NUMÉRIQUES OU EXPÉRIMENTALES

PREMIÈRE GÉNÉRATION CONTRÔLÉE D'UN GAZ DENSE DE SOLITONS

Des chercheurs et chercheuses sont parvenus à effectuer la première synthèse expérimentalement contrôlée d'un gaz dense composé non pas de particules atomiques ou moléculaires mais de solitons, des ondes non-linéaires. Ils ont pu en particulier mesurer pour la première fois la densité d'états du gaz de solitons et mettre en évidence une évolution lente de celle-ci lors de la propagation. Ces résultats sont publiés dans la revue *Physical Review Letters*.

Stéphane Randoux, Enseignant-chercheur à l'Université de Lille

Laboratoire de physique des lasers, atomes et molécules (PhLAM, CNRS / Université de Lille)

Laboratoire de recherche en hydrodynamique, énergétique et environnement atmosphérique (LHEEA, CNRS / École Centrale de Nantes)

Matière et systèmes complexes (MSC, CNRS / Université de Paris)

Laboratoire de physique de l'ENS (LPENS, CNRS / ENS Paris/ Sorbonne Univ. / Univ. de Paris)

Institut Jean Le Rond d'Alembert-Paris (DALEMBERT, CNRS / Sorbonne Univ.)

Nonlinear spectral synthesis of soliton gas in deep-water surface gravity waves. *Phys. Rev. Lett.*, publié le 31 décembre 2020.

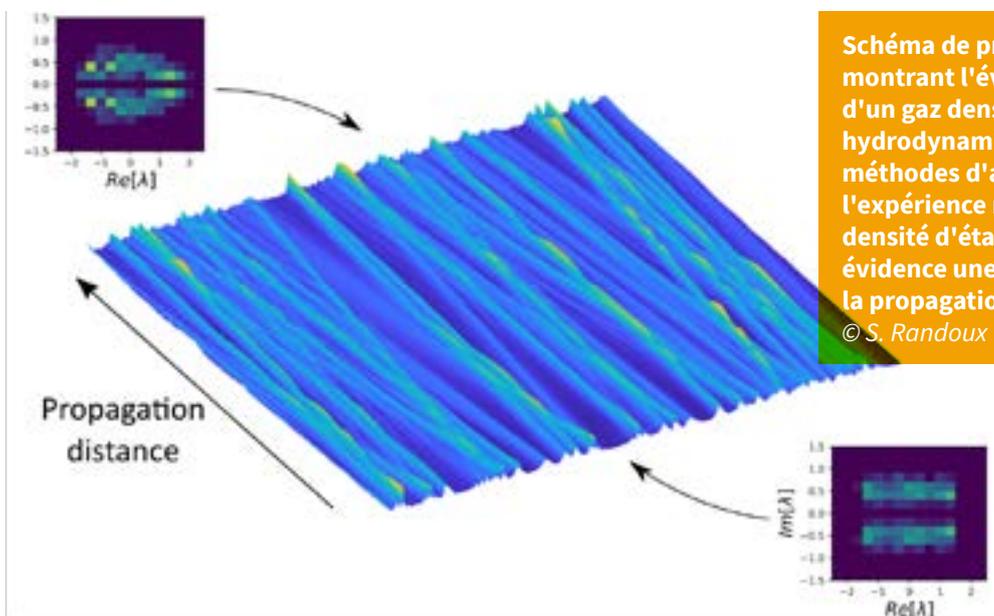
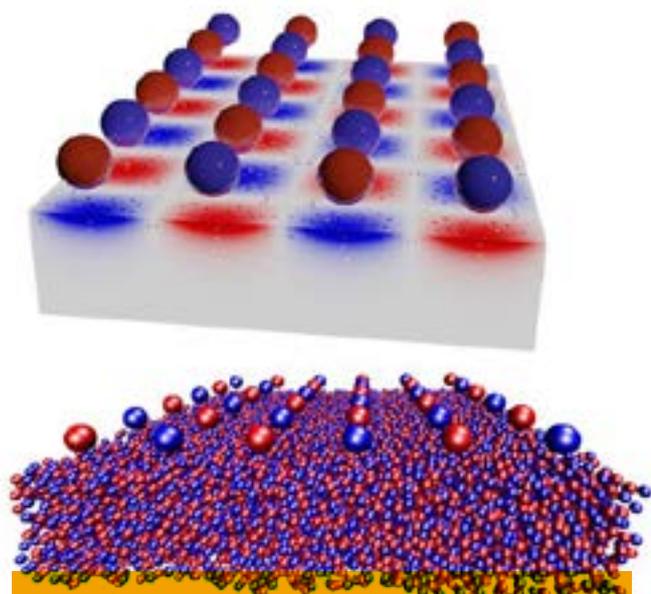


Schéma de principe de l'expérience réalisée montrant l'évolution spatio-temporelle d'un gaz dense de solitons dans le canal hydrodynamique. Grâce à la mise en place de méthodes d'analyse spectrale non linéaire, l'expérience réalisée a permis de mesurer la densité d'états du gaz de soliton et de mettre en évidence une évolution lente de celle-ci lors de la propagation.

© S. Randoux



En haut : illustration des interactions électrostatiques dans un cristal ionique (boules rouges et bleues) à la surface d'un métal imparfait (en gris). Dans cette approche classique, les électrons se massent devant les charges de manière à minimiser l'interaction électrostatique à l'interface entre le cristal ionique et le métal.

En bas : dans la nouvelle approche par simulation moléculaire, un fluide virtuel chargé est utilisé pour mimer l'écrantage induit par le métal. ©Alexander Schlaich

UN FLUIDE VIRTUEL POUR SIMULER DES LIQUIDES CHARGÉS CONFINÉS

Des physiciens ont mis au point un modèle numérique qui permet de simuler et expliquer le comportement d'un liquide chargé électriquement, comme les électrolytes de batteries, lorsqu'il est confiné entre deux plaques métalliques.

Pour y parvenir, les chercheurs ont introduit une nouvelle méthode de simulation à l'échelle atomique qui décrit le confinement ou l'adsorption d'un fluide chargé à proximité d'une surface en prenant en compte les effets de relaxation électronique, autrement dit le mouvement des électrons vers des charges électriques s'approchant du matériau.

Ces résultats sont publiés dans *Nature Materials*.

Benoit Coasne, Chercheur au CNRS

Laboratoire interdisciplinaire de physique (LiPhy, CNRS/UGA)

Laboratoire de physique de l'ENS (LPENS, CNRS/ENS Paris/Sorbonne Univ./Univ. de Paris)

Electronic screening using a virtual Thomas-Fermi fluid for predicting wetting and phase transitions of ionic liquids at metal surfaces. *Nature Materials*, publié le 20 décembre 2021

VERS UNE CONCEPTION DE NOUVELLES PROTÉINES PAR APPRENTISSAGE STATISTIQUE

Une équipe de recherche a proposé une nouvelle approche très efficace de modélisation informatique de protéines dite "généraliste". Publiée dans la revue *Nature Communications* le 4 octobre 2021, cette approche permet de concevoir des séquences protéiques artificielles statistiquement équivalentes aux séquences naturelles, une caractéristique de grand intérêt dans le domaine du « protein design ». Cette publication est la première à bénéficier du soutien financier de l'initiative i-Bio de l'Alliance Sorbonne Université pour la promotion de l'interdisciplinarité dans la recherche biologique.

Martin Weigt, Enseignant-chercheur à Sorbonne Université

Laboratoire biologie computationnelle et quantitative (LCQB, CNRS / Sorbonne Université)

Laboratoire de physique de l'ENS (LPENS, CNRS / ENS Paris / Sorbonne Université / Université de Paris)

Efficient generative modeling of protein sequences using simple autoregressive models. *Nature Communications*, publié le 4 octobre 2021

PHYSIQUE DES PARTICULES : LES MUONS NOUS MÈNERONT-ILS VERS UNE NOUVELLE PHYSIQUE ?

Les muons, des particules cousines des électrons, font tourner la tête des physiciens depuis plus de 10 ans : la mesure expérimentale de leurs propriétés magnétiques diverge en effet de la théorie. Peut-être à cause de particules ou de forces inconnues ? Un nouveau calcul théorique de ce paramètre, impliquant notamment des physiciens du CNRS et publié dans la revue *Nature*, réduit l'écart avec la mesure expérimentale. Mais le débat n'est pas clos pour autant.

Depuis plus de 10 ans, la mesure des propriétés magnétiques du muon (une sorte de cousin éphémère de l'électron) est en désaccord avec les prédictions théoriques, suggérant une possible lacune du modèle standard de la physique des particules et laissant entrevoir une physique plus exotique. Ce 7 avril 2021 est dévoilé le premier résultat de l'expérience « Muon g-2 » de Fermilab, qui mesure l'une de ces propriétés du muon appelée « moment magnétique ».

Si la France ne participe pas directement à cette expérience, une équipe du CNRS a joué un rôle déterminant dans le calcul de la prédiction théorique choisie comme référence et sans laquelle aucune conclusion n'est possible. Pour déterminer la contribution, dite de polarisation hadronique du vide, qui limite actuellement la précision du calcul, cette équipe utilise des mesures effectuées auprès de collisionneurs électron-positon. Cette approche exacte, dépendant seulement de la précision des mesures, a été développée et améliorée par cette équipe depuis plus de 20 ans, conduisant au désaccord avec la mesure expérimentale du moment magnétique du muon.

Une méthode différente a été récemment suivie par une autre équipe comprenant des chercheurs du CNRS, qui révèle dans *Nature* le résultat de son calcul de cette contribution. Or, il réduit l'écart avec la valeur expérimentale connue jusqu'ici. Le modèle standard n'a donc peut-être pas dit son dernier mot ! Pour parvenir à ce résultat, les scientifiques ont calculé cette contribution *ab initio*, c'est-à-dire en ne faisant appel qu'aux équations du modèle standard, sans paramètre supplémentaire. Avec environ un milliard de variables, plusieurs supercalculateurs européens massivement parallèles ont été nécessaires pour relever cet énorme défi. Pour la première fois, un tel calcul rivalise en précision avec l'approche de référence qui donne des valeurs du moment magnétique du muon plus éloignées de la valeur mesurée.

Pour trancher définitivement, il faudra attendre que le résultat de ce calcul théorique soit confirmé par d'autres équipes et comprendre d'où viennent les différences entre les deux approches théoriques. C'est ensemble que les équipes du CNRS relèvent actuellement ce défi. Leur espoir, en combinant les approches, est d'obtenir une nouvelle prédiction théorique de référence suffisamment précise pour décider du sort du modèle standard dans quelques années, lors de la publication des résultats définitifs de l'expérience « Muon g-2 » du Fermilab et d'une expérience ayant des objectifs similaires, menée au Japon.



Évocation du calcul de l'effet de la polarisation du vide hadronique sur le magnétisme du muon. Comme une toupie, le muon (μ) tourne sur lui-même, devenant un minuscule aimant entouré d'un champ magnétique. Le muon suit une trajectoire le long de laquelle il interagit avec l'aimant de l'expérience « Muon g-2 » et avec des particules virtuelles du vide quantique. Il polarise ainsi le vide hadronique, ce qui modifie son moment magnétique. Le fond de 0 et de 1, et le pavage carré, évoquent le calcul sur supercalculateurs qui est l'une des approches décrites ici.

© Dani Zemba

Michel Davier, Enseignant-chercheur à l'Université Paris-Saclay

Laurent Lellouch, Chercheur au CNRS

Laboratoire de physique des 2 infinis - Irène Joliot-Curie (IJCLab, CNRS/ Université Paris-Saclay)

Laboratoire physique nucléaire et hautes énergies (LPNHE, CNRS / Sorbonne Université)

Centre de physique théorique (CPT, CNRS / Aix-Marseille Université / Université de Toulon)

The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model, *Physics Reports*, publié le 3 décembre 2020

Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD, *Nature*, publié le 8 avril 2021

UN PENDULE DANS LE VENT, ÇA BOUGE ÉNORMÉMENT

Sous l'action du vent, un objet tel qu'un arbre ou un avion, peut être soumis à des événements soudains et parfois dommageables dont l'origine n'est pas toujours clairement identifiée. En étudiant les transitions d'un simple pendule sous l'action d'un vent régulier, les chercheuses et les chercheurs démontrent qu'elles obéissent à une statistique de la famille des statistiques extrêmes, c'est-à-dire dues à des événements rares mais intenses.

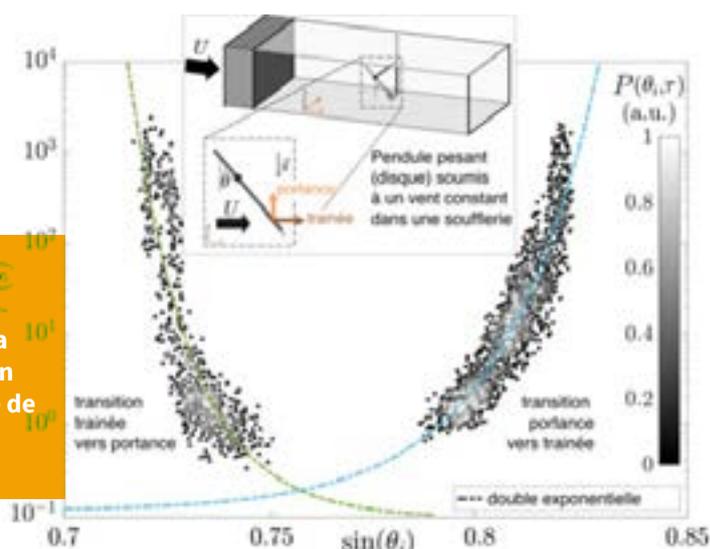
Un objet sous l'action du vent est soumis à des forces aérodynamiques qui sont la force de portance, celle qui fait voler les avions, et la force de traînée, qui caractérise la résistance de l'air. Des tourbillons apparaissent dans le sillage de l'objet, créant des fluctuations importantes de ces forces et pouvant générer des comportements soudains. Ainsi, un simple pendule circulaire soumis à un vent régulier possède deux positions stables en raison des équilibres entre son poids et les forces de portance et de traînée, mais subit des transitions soudaines entre ces deux positions en raison de leurs fluctuations. En observant sur des temps longs le mouvement d'un tel pendule et en analysant ces transitions de façon statistique, les physiciennes et les physiciens ont montré que leur statistique était similaire à celle de la transition vers la turbulence observée dans le cas d'un fluide dans un tuyau, à savoir régies par des événements rares et intenses. Ils posent ainsi le système canonique du pendule simple en interaction aérodynamique comme un paradigme étonnamment simple pour la compréhension des lois statistiques de phénomènes dits extrêmes. Ce travail a été effectué par des chercheuses et chercheurs du Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon et publié dans les *Physical Review Letters*.

Schéma du dispositif expérimental et distribution des temps d'attente (τ) pour observer les transitions entre les deux branches, dominées par la traînée ou la portance, en fonction du sinus de l'angle de la position initiale (θ_0) qui est proportionnel à l'énergie cinétique de l'écoulement des souffleries (vitesse du vent U).

© Nicolas Plihon

Pour réaliser cette étude, un système entièrement automatisé a été mis au point, afin de contrôler la position initiale du pendule, au choix sur l'une des deux branches stables (branche dominée par la portance ou branche dominée par la traînée) en fonction de la vitesse du vent, puis de détecter de manière systématique l'occurrence d'une transition d'une branche vers l'autre par un suivi précis de sa position angulaire, et enfin de ramener le pendule sur la branche initiale. En répétant un tel cycle des milliers de fois (ce qui correspond à plusieurs semaines d'expérimentation) il est possible de caractériser très précisément les lois statistiques régissant ces transitions. L'étude est particulièrement complexe car les transitions se produisent de manière aléatoire, avec des temps d'attente pouvant varier de quelques secondes à plusieurs heures. Grâce à cette observation, les scientifiques ont ensuite construit une modélisation des statistiques de transition du pendule à partir d'une analogie conceptuelle avec un grand problème de la mécanique des fluides : la

transition vers la turbulence. De manière remarquable, il a été notamment observé que les fluctuations du couple exercé par les forces aérodynamiques sur le pendule obéissaient à une distribution de Gumbel, bien connue dans la famille des statistiques dites extrêmes. Cette étude indique aussi que les transitions observées sur le pendule ne sont pas déclenchées par des événements exceptionnels provenant du vent appliqué mais auto-induites par des événements tourbillonnaires exceptionnels naissant dans son propre sillage. L'étape suivante est de visualiser le sillage du pendule de façon tridimensionnelle et résolue en temps, et d'utiliser ce système simple de pendule pour développer des protocoles de contrôle de sa position, avec de potentielles applications en aérodynamique où ces phénomènes de tourbillons de sillage sont bien connus.



Nicolas Plihon, Chercheur au CNRS

Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon (LPENSL, CNRS/ ENS de Lyon)

Rare Event-Triggered Transitions in Aerodynamic Bifurcation. *Physical Review Letters*, publié le 9 mars 2021

FABRIQUER DES NANOSÉISMES EN LABORATOIRE

À l'aide d'un simple assemblage de billes de verres comprimé, des chercheurs sont parvenus à reproduire précisément le glissement de deux plaques tectoniques l'une contre l'autre, un phénomène à l'origine des tremblements de terre.

Le glissement des plaques tectoniques le long des failles sismiques engendre des tremblements de terre parfois dévastateurs. Encore essentiellement imprévisibles de nos jours malgré plus d'un siècle d'études, les séismes obéissent pourtant à des lois statistiques universelles. L'origine de ces lois, établies empiriquement au XX^{ème} siècle, reste en partie obscure. La création en laboratoire de failles modèles reproduisant les caractéristiques statistiques des tremblements de terre naturels constitue donc un enjeu fondamental pour leur compréhension. Une équipe pluridisciplinaire associant des physiciens, des physiciennes et des géophysiciens a mis au point dans une expérience une faille modèle reproduisant fidèlement, à l'échelle du laboratoire, les propriétés des failles terrestres naturelles.

Dans cette expérience, un milieu granulaire composé de billes de verre est lentement comprimé. Après une phase transitoire, un plan de glissement se forme spontanément entre deux blocs frottant l'un contre l'autre, à la manière de deux plaques tectoniques de la croûte terrestre. Grâce à une méthode interférométrique, les chercheurs ont montré que le glissement le long de cette faille modèle s'opère sous la forme d'une succession de petits glissements assimilables à des nanoséismes. Ils sont de vingt ordres de grandeur (10^{20}) moins énergétiques que les séismes naturels, mais caractérisés par des lois statistiques en tous points similaires à celles des tremblements de terre, que ce soit les distributions des magnitudes (loi de Gutenberg-Richter), l'occurrence de répliques (loi d'Omori et loi de productivité), et les corrélations existantes entre occurrences de séismes. Par exemple, la succession des tremblements de terre dans une même région est comparable temporellement à la succession des nanoséismes en laboratoire (figure). Comparée à d'autres techniques, l'interférométrie permet à la fois de mesurer ces très petits déplacements, mais aussi de les visualiser, ce qui serait impossible avec des méthodes plus classiques,

notamment acoustiques. Ces travaux sont publiés dans la revue *Communications Earth & Environment* le 14 mai 2021.

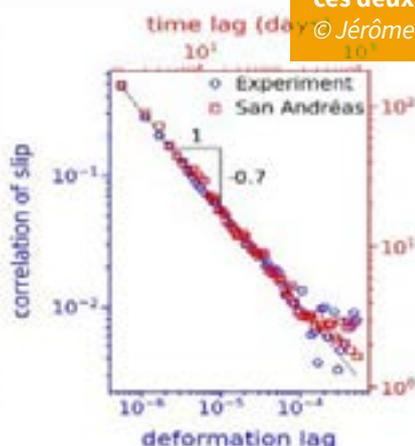
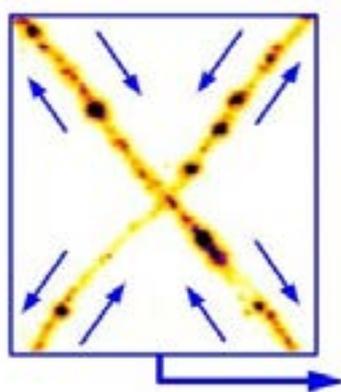
En modélisant la croûte terrestre avec de simples billes de verre, les chercheurs sont parvenus à une description la plus simple qui soit d'un tel système. Ce modèle de faille sismique réaliste et élémentaire permet des études jusqu'ici inenvisageables à l'échelle de la tectonique terrestre. Par exemple, l'origine de la dépendance temporelle des répliques est toujours débattue. Ce dispositif permettrait d'estimer l'implication des vitesses relatives des plaques dans l'occurrence des répliques, et de la distinguer d'une dépendance purement temporelle. Il offre également la possibilité d'étudier l'effet d'un bruit mécanique (par exemple de la fracturation hydraulique) comme source possible de déclenchement de tremblements de terre.

Jérôme Crassous, Enseignant-chercheur à l'Université Rennes 1

Institut de physique de Rennes (IPR, CNRS / Université Rennes 1)

Institut des sciences de la Terre (ISTERRE, CNRS / Université Savoie Mont Blanc / IRD / Université Grenoble Alpes)

Micro-slips in an experimental granular shear band replicate the spatiotemporal characteristics of natural earthquakes, *Communications Earth & Environment*. Publié le 14 mai 2021.



À gauche : bandes de cisaillement dans un milieu granulaire comprimé.

À droite : faille de San Andrés.

Au centre : corrélation des déformations pour ces deux systèmes.

© Jérôme Crassous



COMPRENDRE LES TRANSFERTS D'ÉNERGIE LORS DE LA PHOTOSYNTHÈSE

A l'aide de trois pigments manipulés par microscopie à effet tunnel, des chercheurs et des chercheuses étudient les transferts d'énergie entre molécules en imitant la photosynthèse des végétaux.

La photosynthèse permet aux végétaux de transformer l'énergie solaire en énergie chimique nécessaire à leur croissance. Ce mécanisme est réalisé par un assemblage complexe de molécules organiques, les pigments, ayant pour but de collecter, transporter et transformer l'énergie solaire. Les transferts d'énergie successifs se font par sauts entre molécules voisines, mais également via des phénomènes collectifs, potentiellement cohérents, impliquant simultanément un plus grand nombre de pigments. Mieux comprendre ces effets nécessite de décortiquer ces assemblages de pigments, afin d'étudier séparément le rôle de chaque unité active dans la photosynthèse. Dans cette étude, en adoptant une approche dite « bottom-up », les chercheurs et les chercheuses utilisent des pigments modèles isolés les uns des autres, qu'ils réassemblent ensuite de sorte à former les premières bases fonctionnelles capables de reproduire les mécanismes de transfert d'énergie intervenant dans la photosynthèse. Ces travaux ont été menés par une équipe de l'Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg (IPCMS, CNRS/Univ. de Strasbourg) associée à une équipe de l'Institut Franche-Comté électronique mécanique thermique et optique – sciences et technologies (FEMTO-ST, CNRS/COMUE UBFC) et ils sont publiés dans *Nature Chemistry*.

Trois pigments différents sont ainsi déposés par évaporation sur une surface en très faible quantité, afin de disposer de molécules éloignées les unes des autres. Un microscope à effet tunnel permet de visualiser chacun des pigments, puis de les manipuler un à un, de sorte à former des structures proches des briques élémentaires observées dans les systèmes photosynthétiques naturels. Un premier pigment, dit donneur, absorbe une excitation. Un second joue le rôle d'intermédiaire qui, selon sa nature, augmente ou réduit l'efficacité du transfert d'énergie. Un troisième pigment, accepteur, transforme cette énergie en photon. Dans l'expérience, le microscope à effet tunnel est utilisé pour émettre un électron afin de générer une excitation locale d'un des pigments, ce qui permet de reproduire le mécanisme d'absorption d'un photon par un pigment de la plante. L'énergie reçue par l'accepteur est convertie en photons plutôt qu'en énergie chimique. La réaction correspond ainsi à une photosynthèse à l'envers, la capture d'un électron amenant à la libération d'un photon, mais les transferts d'énergie s'opèrent de la même façon.

Cette approche permet de contrôler la distance et l'orientation entre les pigments avec une précision proche de la distance séparant deux atomes et les chercheurs ont ainsi pu mettre en avant le rôle joué par des interactions dans le mécanisme de transfert d'énergie. Elles sont soit de longue portée, de type dipôle-dipôle, soit de courte portée, ces dernières relevant d'un mécanisme, dit d'échange, propre à la physique quantique. Cette étude montre éga-

lement que, selon sa nature chimique, le pigment intermédiaire peut jouer un rôle de relais actif de l'excitation, amplifier le transfert d'énergie entre deux molécules sans directement intervenir dans le processus, ou partiellement le bloquer.

Ainsi, en utilisant des briques élémentaires similaires à celles utilisées par la plante pour transporter et convertir l'énergie solaire, les chercheurs ont mis au point une plateforme pour reproduire les mécanismes fins de la photosynthèse et, dans un futur proche, les élucider.

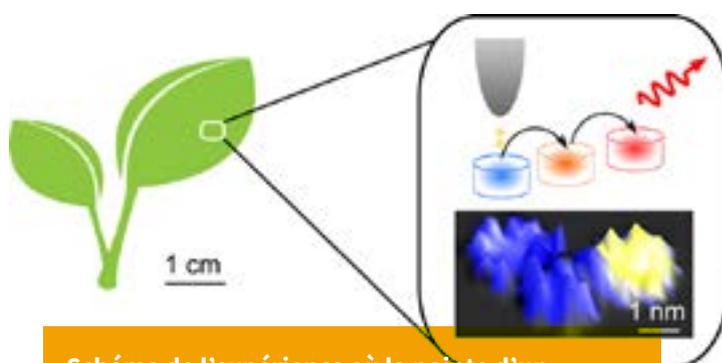


Schéma de l'expérience où la pointe d'un microscope à effet tunnel (en gris) est utilisée pour exciter un assemblage de trois pigments proches de ceux impliqués dans la photosynthèse des végétaux. L'excitation générée dans le pigment bleu est transférée, séquentiellement, jusqu'au pigment rouge où l'énergie est transformée en photon (en haut). Image de fluorescence hyper-résolue des trois pigments (en bas).

©Guillaume Schull

Guillaume Schull, Chercheur au CNRS

Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg (IPCMS, CNRS / Université de Strasbourg)
Institut Franche-Comté électronique mécanique thermique et optique – sciences et technologies (FEMTO-ST, CNRS / COMUE UBFC)

Energy funnelling within multichromophore architectures monitored with subnanometre resolution. S. Cao et al., *Nature Chemistry*. Publié le 24 mai 2021.

LA SYNTHÈSE DES PREMIERS ACIDES AMINÉS RECONSTITUÉE PAR ORDINATEUR

La synthèse spontanée des briques élémentaires du vivant dans la Terre primordiale, ou dans les météorites, est au cœur de la chimie prébiotique. Ces synthèses représentent un ensemble de réactions chimiques complexes, du fait du grand nombre de molécules y prenant part, et de la diversité des conditions géochimiques environnantes. En particulier, l'émergence des acides aminés, constituants de base des protéines, est traditionnellement expliquée via le mécanisme dit "de Strecker", une série de réactions multi-composants en solution aqueuse. Cependant, cette hypothèse n'avait jamais reçu de confirmation rigoureuse par des calculs en chimie quantique, tenant compte également d'une description réaliste de l'environnement. C'est le cas désormais grâce aux travaux de chercheurs, qui ont réalisé une étude au niveau quantique de la synthèse

de Strecker des acides aminés, avec une description explicite du solvant. Elle a été publiée le 10 mars 2021 dans *Journal of Physical Chemistry Letters*.

Antonino Marco Saitta, Enseignant-chercheur à Sorbonne Université
Théo Magrino, Doctorant à Sorbonne Université

Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (IMPMC, MNHN / CNRS / Sorbonne Université)

Step by Step Strecker Amino Acid Synthesis from ab Initio Prebiotic Chemistry. *Phys. Chem Lett.* Publié le 10 mars 2021



Fragment de la météorite de Murchison (droite), et particules prélevées pour analyse (dans le tube à essai). Les analyses effectuées ont permis d'identifier des acides aminés dans la météorite.
© United States Department of Energy

COMPRENDRE LA CYTOTOXICITÉ DES NANOPARTICULES MÉTALLIQUES

Un des enjeux majeurs des nanoparticules est leur biocompatibilité. Les chercheurs et chercheuses, spécialistes de physique et de chimie des surfaces, analysent ici le rôle du métal dans l'interaction de nanoparticules métalliques avec des molécules impliquées dans la défense des cellules contre l'oxydation (catéchols). Ils révèlent ainsi un mécanisme catalysé par le métal entraînant leur propre oxydation et pouvant expliquer la toxicité des nanoparticules. Ces résultats sont publiés dans la revue *Chemical Science*.

Johann Coraux, Chercheur au CNRS
Frédéric Chérioux, Chercheur au CNRS

Institut Néel (NEEL, CNRS / Université Grenoble Alpes)
institut Franche-Comté électronique mécanique thermique et optique - sciences et technologies (FEMTO-ST, CNRS / COMUE UBFC)

Copper-assisted oxidation of catechols into quinone derivatives. *Chem. Sci.* Publié le 21 décembre 2020.

MAGNÉTISME ET PHOTONIQUE POUR LES TECHNOLOGIES DE DEMAIN



FABRIQUER UN FILTRE À SPIN AVEC DU GRAPHÈNE 2D

L'ajout d'une couche monoatomique de graphène dans une jonction magnétique modifie ses propriétés et permet de la transformer en un filtre à spin aux propriétés très utiles en spintronique. Des chercheurs et chercheuses ont ainsi montré qu'une monocouche bidimensionnelle de graphène placée sur une électrode ferromagnétique de cobalt peut servir d'interface ultime pour la spintronique.

Alors que l'habitude est plutôt de chercher à préserver les propriétés intrinsèques du graphène, ces travaux publiés dans *Nature Communications* démontrent qu'il peut être au contraire très utile de les modifier.

Bruno Dlubak, Chercheur au CNRS

Pierre Seneor, Enseignant-chercheur à l'Université Paris-Saclay

Unité mixte de physique CNRS-Thalès (UMPhy, CNRS / Thalès / Université Paris-Saclay)

Spin filtering by proximity effects at hybridized interfaces in spin-valves with 2D graphene barriers. *Nature Communications*, publié le 09 novembre 2020

COUPLES AUTO-INDUITS SUR L'AIMANTATION D'UNE COUCHE MAGNÉTIQUE: UNE NOUVELLE VOIE POUR LES COMPOSANTS SPINTRONIQUES

La spintronique offre des solutions nouvelles à la réalisation de composants mémoire et logique basés sur le transport d'aimantation par des courants d'électrons dits courants de spin. Les physiciennes et les physiciens démontrent ici une nouvelle façon de contrôler l'aimantation des dispositifs en générant ces courants à l'intérieur de matériaux magnétiques sans l'intervention de métal lourd externe.

Ces résultats sont publiés dans la revue *Advanced Materials*.

Juan Carlos Rojas-Sanchez, Chercheur au CNRS

Albert Fert, Enseignant-chercheur à l'Université Paris-Saclay

Institut Jean Lamour (IJL, CNRS / Université de Lorraine)

Unité mixte de physique CNRS-Thalès (UMPhy, CNRS / Thalès / Université Paris-Saclay)

Efficient generative modeling of protein sequences using simple autoregressive models. *Nature Communications*. Publié le 19 février 2021

UN NEURONE IONIQUE ARTIFICIEL POUR LES MÉMOIRES ÉLECTRONIQUES DE DEMAIN

L'électronique inspirée du cerveau est l'objet d'intenses recherches. Dans ce cadre, des scientifiques du CNRS et de l'École normale supérieure - PSL ont théorisé le développement de neurones artificiels utilisant, comme les cellules nerveuses, des ions comme vecteurs d'information. Leurs travaux, publiés dans Science le 6 août 2021, montrent que des dispositifs constitués d'une seule couche d'eau transportant des ions au sein de nanofentes de graphène auraient la même capacité de transmission qu'un neurone.

Pour une consommation énergétique équivalente à deux bananes par jour, le cerveau humain est capable de réaliser un grand nombre de tâches complexes. Sa grande efficacité énergétique dépend notamment de son unité de base, le neurone, qui possède une membrane pourvue de pores nanométriques, appelés canaux ioniques, qui s'ouvrent et se ferment en fonction des stimuli reçus. Les flux d'ions obtenus créent un courant électrique responsable de l'émission de potentiels d'action, des signaux permettant aux neurones de communiquer entre eux.

De son côté, l'intelligence artificielle ne peut réaliser toutes ces tâches qu'au prix d'une consommation énergétique des dizaines de milliers de fois supérieure à celle du cerveau humain. Tout l'enjeu de la recherche aujourd'hui est donc de concevoir des systèmes électroniques aussi économes en énergie que le cerveau humain, par exemple en utilisant des ions, et non des électrons, comme vecteurs de l'information. Pour cela, la nanofluidique, qui étudie les comportements de fluides dans des canaux de dimensions inférieures à 100 nanomètres, offre de nombreuses perspectives. Dans une nouvelle étude, une équipe du Laboratoire de physique de l'ENS (CNRS/ENS-PSL/Sorbonne Université/Université de Paris) montre comment construire un prototype de neurone artificiel, constitué de fentes en graphène extrêmement fines dans lesquelles est confinée une couche unique de molécules d'eau. Les scientifiques ont montré que sous l'effet d'un champ électrique, les ions issus de cette couche d'eau s'assemblent en grappes allongées et développent une

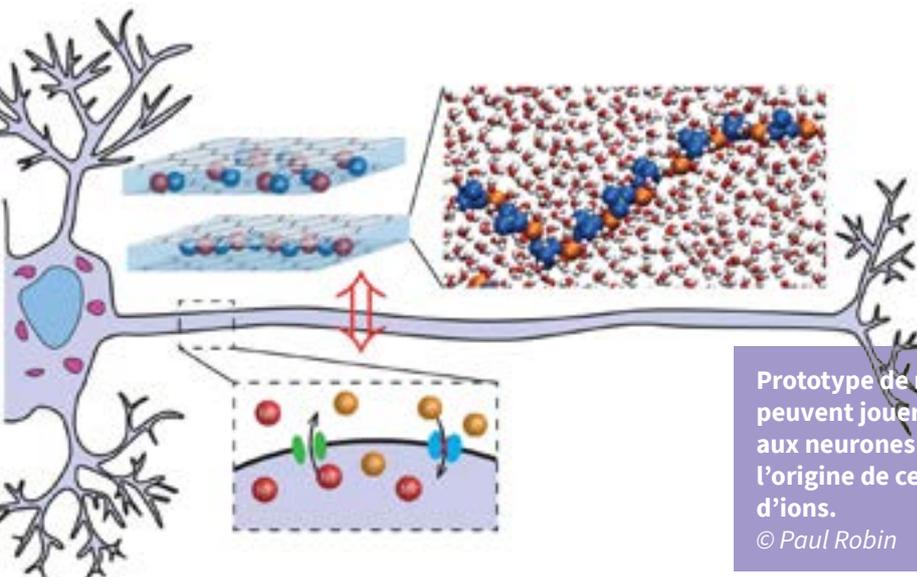
propriété connue sous le nom d'effet memristor : ces grappes gardent en mémoire une partie des stimuli reçus dans le passé. Pour reprendre la comparaison avec le cerveau, les fentes en graphène reproduisent les canaux ioniques, les grappes, les flux d'ions. Et à l'aide d'outils théoriques et numériques, les scientifiques ont montré comment assembler ces grappes pour reproduire le mécanisme physique de l'émission des potentiels d'action, et donc la transmission d'information.

Ce travail théorique se poursuit du côté expérimental au sein de l'équipe française, en collaboration avec des scientifiques de l'université de Manchester (Royaume-Uni). Le but est désormais de prouver expérimentalement que de tels systèmes sont capables d'implémenter des algorithmes d'apprentissage simples, qui pourront servir de base aux mémoires électroniques de demain. Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans la revue *Science*.

Paul Robin, Doctorant à l'ENS-PSL
Lydéric Bocquet, Chercheur au CNRS

Laboratoire de physique de l'ENS (CNRS / ENS-PSL / Sorbonne Université / Université de Paris)

Modeling of emergent memory and voltage spiking in ionic transport through angstrom-scale slits.
Science. Publié le 6 août 2021.



Prototype de neurone artificiel : les fentes nanofluidiques peuvent jouer le rôle des canaux ioniques, qui permettent aux neurones de communiquer. Le transport d'ions à l'origine de cette communication est assuré par des grappes d'ions.

© Paul Robin

TRANSMISSION ET RÉFLEXION DE CHARGES ÉLECTRONIQUES FRACTIONNAIRES

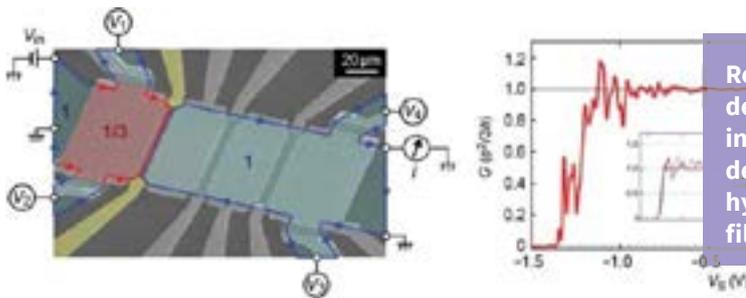
À l'interface entre un conducteur et un supraconducteur, un électron incident peut être transmis dans le supraconducteur comme deux électrons formant une paire de Cooper, grâce à la réflexion d'un trou dans le conducteur: c'est la réflexion d'Andreev. Des scientifiques démontrent ici le même effet pour un gaz d'électrons bidimensionnel et des charges fractionnaires. Cette étude, publiée dans la revue *Nature Communications*, constitue une étape importante dans la compréhension et la manipulation de ces

quasiparticules dont les propriétés extraordinaires pourraient mener à des applications en information quantique.

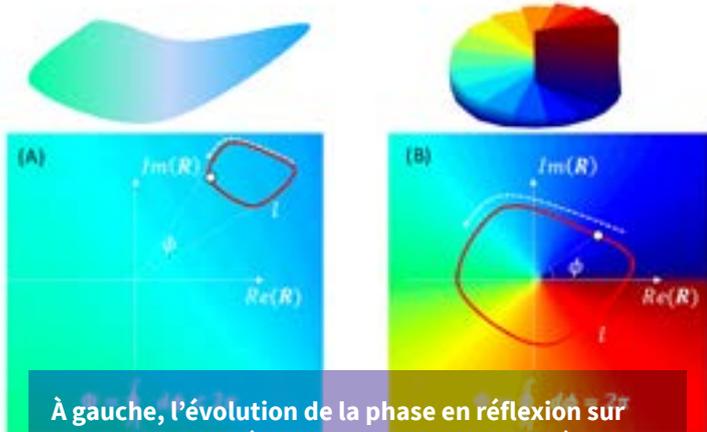
Thibaut Jonckheere, Chercheur au CNRS

Centre de physique théorique (CPT, CNRS / Aix-Marseille Université / Université de Toulon)

Andreev reflection of fractional quantum Hall quasi-particles. *Nature Communications*. Publié le 6 août 2021



Représentation schématique du dispositif étudié: La vanne de spin est constituée d'une monocouche de graphène insérée entre des couches ferromagnétiques de nickel et de cobalt. Leur couplage forme un matériau quantique hybride, de l'épaisseur d'une interface, développant un filtrage de spin élevé. © Thibaut Jonckheere, CPT.



À gauche, l'évolution de la phase en réflexion sur une boucle fermée dans l'espace des paramètres géométriques ne permet pas d'accumuler un déphasage conséquent. À droite, lorsque la boucle encercle un zéro, ou encore une singularité topologique, un déphasage d'exactly 2π . © CRHEA

UN NOUVEAU MÉCANISME POUR MANIPULER LA LUMIÈRE DANS LES MATÉRIAUX ULTRAPLATS

Des chercheurs du Centre de recherche sur l'hétéro-épitaxie et ses applications (CRHEA, CNRS) ont mis au point une technique permettant de contrôler la phase d'une onde lumineuse en jouant sur la géométrie de structures nanométriques. Cela ouvre la voie à des composants optiques miniaturisés, capables de manipuler des rayons lumineux avec une précision jamais atteinte. Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans la revue *Science*.

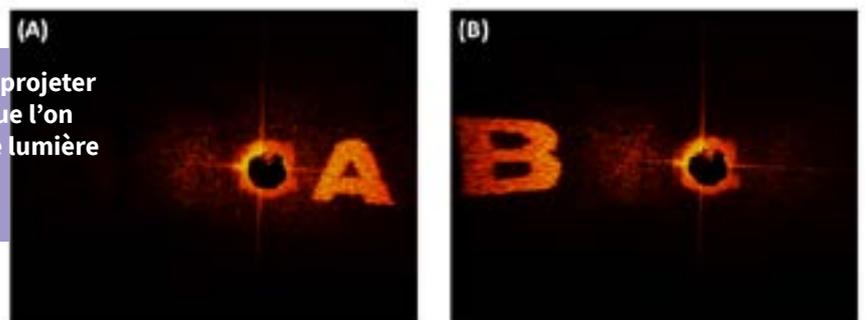
Patrice Genevet, Chercheur au CNRS

Centre de recherche sur l'hétéro-épitaxie et ses applications (CRHEA, CNRS)

Plasmonic topological metasurface by encircling an exceptional point. *Science*. Publié le 19 août 2021

Les métasurfaces topologiques permettent de projeter deux images holographiques différentes lorsque l'on illumine le composant à l'aide d'un faisceau de lumière polarisée gauche (A) ou droite (B).

© CRHEA



DES NANOCHAISES POUR MANIPULER LA LUMIÈRE

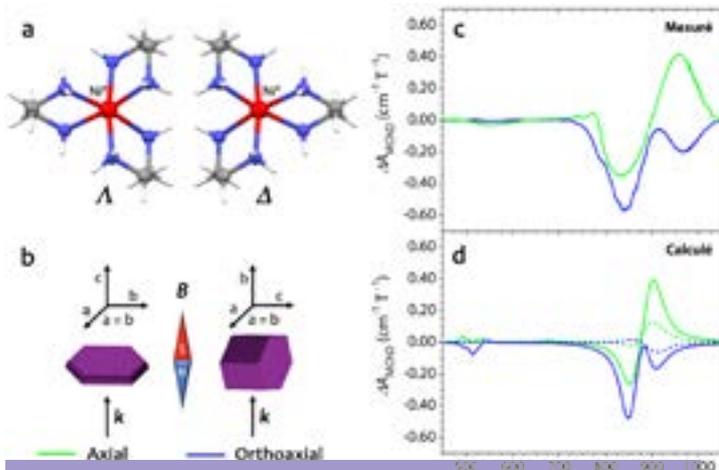
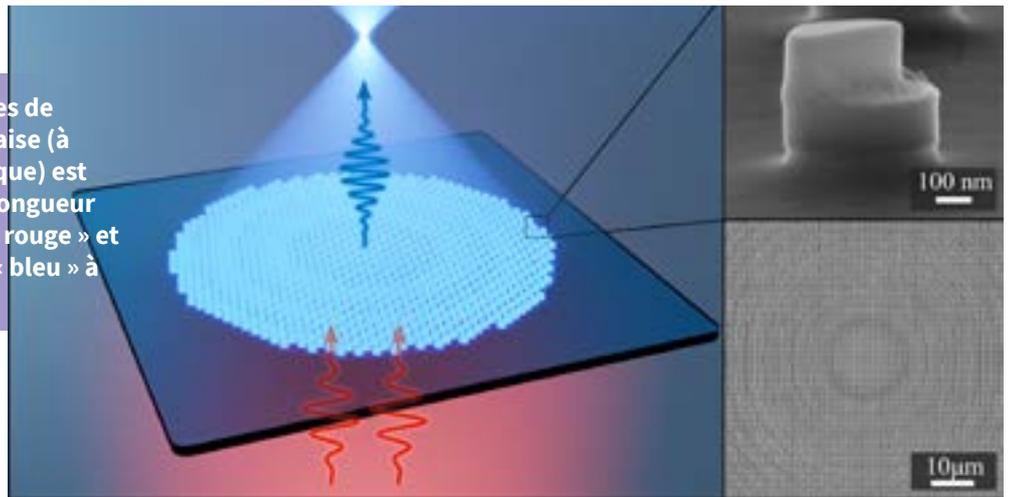
En concevant des métasurfaces structurées en forme de nanochaînes, des chercheurs sont parvenus à fabriquer des lentilles d'une épaisseur comparable à celle d'un virus, capables de modifier la couleur d'un faisceau lumineux, tout en contrôlant sa focalisation. Ces résultats sont publiés dans la revue *Optica*.

Giuseppe Leo, Enseignant-chercheur à l'Université de Paris

Matériaux et phénomènes quantiques (MPQ, CNRS/ Université de Paris)

Tensorial phase control in nonlinear meta-optics. *Optica*. Publié le 13 janvier 2021.

Un réseau de plusieurs centaines de nanostructures en forme de chaise (à droite au microscope électronique) est capable de diviser par deux la longueur d'onde d'un faisceau incident « rouge » et de focaliser le faisceau généré « bleu » à une distance choisie. © C. Gigli



MAGNÉTISME ET CHIRALITÉ : UN MARIAGE ÉCLAIRÉ

On sait depuis Pasteur et Faraday que renverser la direction d'un champ magnétique ou inverser la symétrie miroir de molécules joue sur la propagation de la lumière. Associer les deux effets génère une anisotropie dite magnéto-chirale. En comparant expérience et modélisation dans le cas de complexes du nickel chiraux, les chercheuses et chercheurs valident ici pour la première fois une théorie microscopique et mettent en évidence le rôle du couplage des mouvements des électrons et des atomes dans l'intensité de l'anisotropie magnéto-chirale.

Cette étude a été publiée dans la revue *Science Advances*.

Geert Rikken, Chercheur au CNRS

Laboratoire national des champs magnétiques intenses (LNCMI, CNRS / Université Grenoble Alpes / INSA Toulouse / Université Paul Sabatier)

Institut de chimie de la matière condensée de Bordeaux (ICMCB, CNRS / Université de Bordeaux)

Centre de recherche Paul Pascal (CRPP, CNRS/ Université de Bordeaux)

Validation of Microscopic Magneto-Chiral Dichroism Theory. *Science Advances*. Publié le 21 avril 2021.

(a) Représentation des deux formes chirales L et D du complexe métallique, avec l'ion Ni²⁺ en rouge, et les atomes d'azote (bleu), de carbone (noir) et d'hydrogène (blanc). (b) Géométrie de la mesure de l'anisotropie magnéto-chirale : k donne la direction de propagation de la lumière qui est parallèle ou antiparallèle au champ magnétique (une seule orientation représentée ici). Deux cas sont considérés, axial et orthoaxial, suivant l'orientation de l'axe cristallographique de l'échantillon chiral. (c) Mesures de DA qui mesure l'AMC pour la forme D pour les deux cas axial et orthoaxial (T = 4 K et B = 1 T). (d) Calculs de DA dans les mêmes conditions que (c), avec (traits continus) et sans (tirets) le couplage avec la vibration atomique.

© G. Rikken

UN COURANT SUPRACONDUCTEUR MAGNÉTISÉ ET SUPERCOHÉRENT

Le courant passant par une jonction entre deux matériaux supraconducteurs, appelée jonction Josephson, a à la fois des propriétés quantiques et des propriétés supraconductrices. Les chercheurs ont créé un dispositif pour lequel le courant est magnétisé et la longueur caractéristique de la cohérence quantique est décuplée, tout en ayant un effet supraconducteur à plus haute température.

Ces travaux sont publiés dans la revue *Nature Materials*.

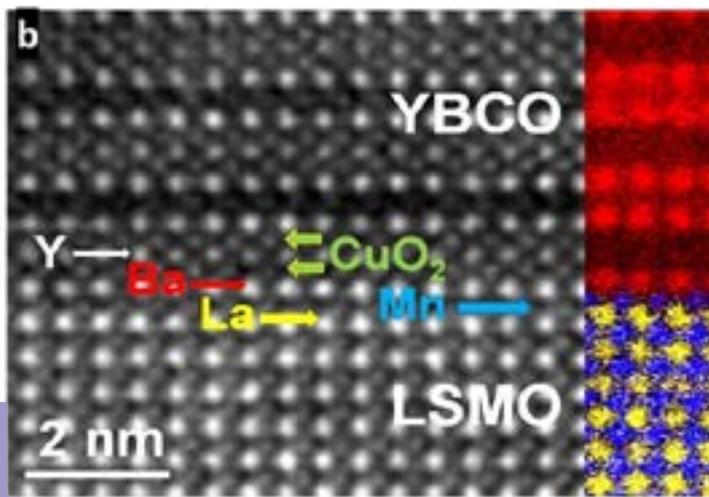
Javier Villegas, Chercheur au CNRS

Unité mixte de physique CNRS-Thalès (UMPhy, CNRS / Thalès / Université Paris-Saclay)

Laboratoire de physique et études des matériaux (LPEM, CNRS / ESPCI)

Laboratoire ondes et matière d'Aquitaine (LOMA, CNRS / Université de Bordeaux)

Extremely long range, high-temperature Josephson coupling across a half-metallic ferromagnet. *Nature Materials*, Publié le 03 décembre 2021.



(a) Image d'un dispositif vue d'en haut (microscopie optique), ALO désigne l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 .
(b) Image de microscopie électronique en transmission montrant une coupe transversale de l'interface YBCO/LSMO. Les couleurs à droite correspondent à une cartographie réalisée par spectroscopie d'électrons des atomes de baryum en rouge, de lanthanide en jaune et de manganèse en bleu montrant nettement l'interface entre les deux matériaux.

© J. E. Villegas

MATÉRIAUX, SYNTHÈSE ET PROPRIÉTÉS : DU NANOPORE AU SUPRACRISTAL



FAIT MARQUANT

TRANSITION LIQUIDE-LIQUIDE ET SECOND POINT CRITIQUE DÉVOILÉS DANS LE SOUFRE

L'existence de deux phases liquides de densités distinctes a été démontrée pour la première fois dans le soufre. L'équipe de chercheurs et de chercheuses a également mis en évidence un second point critique entre ces deux phases, une caractéristique prédite et recherchée dans l'eau depuis presque 30 ans.

Toute substance peut exister à l'état liquide et gazeux, et passer de l'un à l'autre en fonction de la pression (P) ou de la température (T). Pour des conditions P, T en dessous des conditions dites « critiques », le changement d'état est caractérisé par une variation soudaine et importante de la densité. Lorsqu'on se rapproche puis dépasse les conditions critiques (qui définissent un point dans le plan P-T dit point critique), le saut de densité diminue puis s'annule. On passe alors du gaz au liquide de façon continue : c'est l'état « fluide » ou « supercritique ». Au voisinage du point critique, la matière "hésite" entre l'état liquide et l'état gazeux, produisant des fluctuations géantes de densité : c'est le phénomène d'opalescence critique. Les fluides supercritiques sont utilisés massivement dans l'industrie chimique car ce sont d'excellents solvants. Dans les années 90, un second point critique a été suggéré dans l'eau à partir de simulations numériques. Celui-ci terminerait une ligne de transition dans le plan P-T séparant cette fois deux phases liquides. Mais il n'a jamais pu être observé expérimentalement.

Dans cette étude publiée dans *Nature*, des chercheurs et des chercheuses du synchrotron européen ESRF, de l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (IMPMC, CNRS/MNHN/Sorbonne Univ./IRD), et du CEA ont étudié le comportement du soufre liquide dans la zone 0-30 kbar, 300-1100 K. L'équipe a démontré qu'une transition liquide-liquide existe dans le soufre et elle a déterminé la ligne de transition dans le plan P-T. Il s'agit seulement du deuxième exemple de transition liquide-liquide observée dans un liquide mono-composant et thermodynamiquement stable, après le phosphore. Ce travail

est aussi le premier à montrer expérimentalement l'existence d'un second point critique associé à la transition liquide-liquide, terminant la ligne de transition (point C dans la figure). En effet, en faisant varier la pression à une température supérieure à 1050 K, les scientifiques ont observé que la densité évolue continûment, contrairement aux sauts observés à plus basse température. Ceci indique la présence d'un point critique situé vers 21.5 kbar et 1035 K. La variation du saut de densité le long de la transition est également intrigante : en s'éloignant du point critique, le saut de densité commence par augmenter puis passe par un maximum à environ 750 K avant de chuter. C'est un comportement bien différent de celui de la transition liquide-gaz, pour laquelle le saut de densité augmente de façon monotone en s'éloignant du point critique.

Pour parvenir à ces résultats, l'équipe a dû mettre au point un support totalement inerte, le soufre étant un composé très réactif. Elle a ainsi réalisé une capsule en diamant d'un millimètre de diamètre, fermée par un bouchon en chlorure de sodium. Les mesures ont eu lieu à l'ESRF, grâce à des faisceaux de rayons X dirigés vers l'échantillon. L'absorption des rayons X renseigne sur la densité du soufre, et la diffraction révèle son organisation au niveau atomique. L'équipe a ainsi pu démontrer que le liquide de haute densité est essentiellement composé de chaînes d'atomes de soufre, alors que celui de basse densité contient à la fois des molécules S₈ et des chaînes.

Cette étude devrait permettre d'avancer dans la compréhension physique de ce phénomène, et par extension, de celle de l'état liquide et notamment l'existence d'un second point critique dans l'eau. De plus, les conditions P-T du point critique étant relativement facile d'accès, il ouvre des perspectives très intéressantes pour la caractérisation des phénomènes critiques (comme l'opalescence observée dans la transition liquide-gaz) associés aux transitions liquide-liquide. Une meilleure compréhension des transitions liquide-liquide pourrait également aboutir à de nouvelles applications fondées sur le contrôle des propriétés physiques du liquide.

Frédéric Datchi, Chercheur au CNRS

Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (IMPMC, CNRS/MNHN/Sorbonne Univ./IRD)

Liquid-liquid transition and critical point in sulfur.
Nature, publié le 19 août 2020

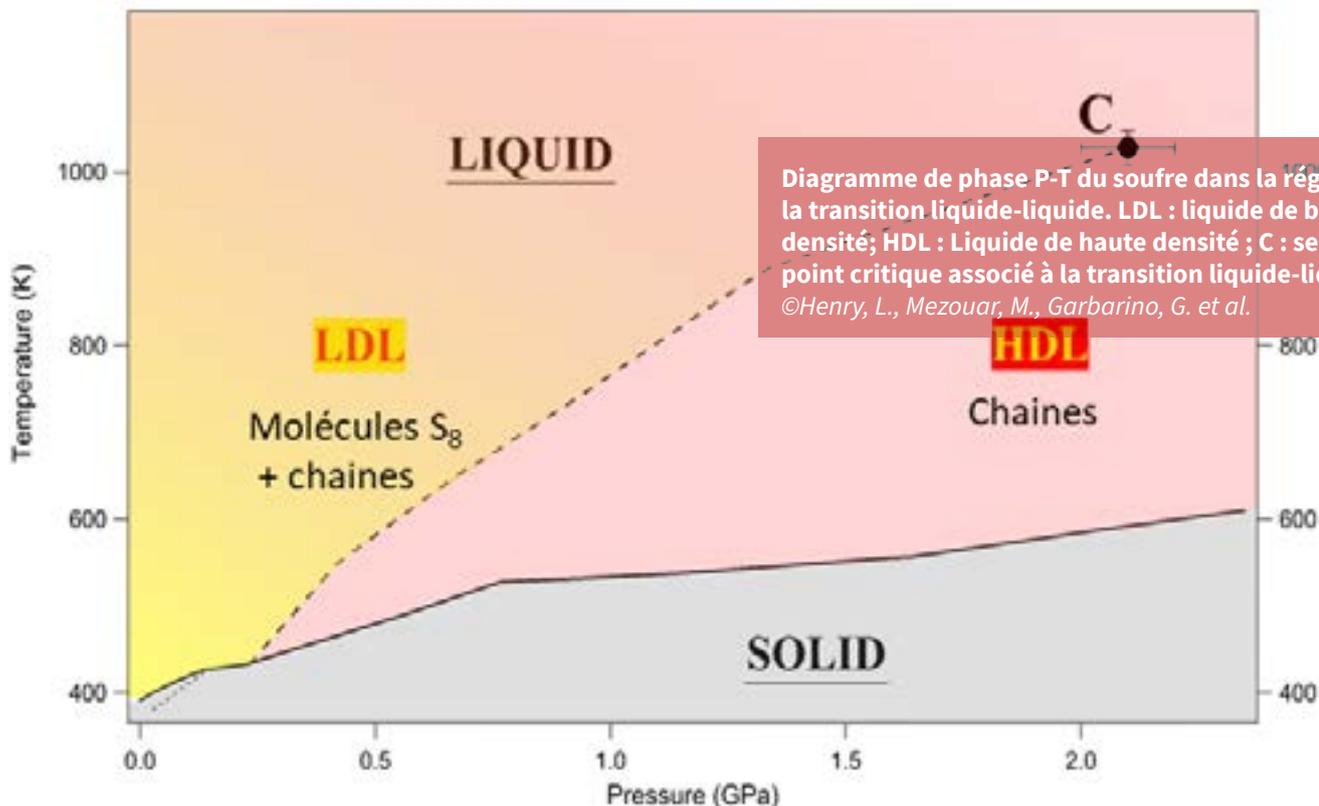


Diagramme de phase P-T du soufre dans la région de la transition liquide-liquide. LDL : liquide de basse densité; HDL : Liquide de haute densité; C : second point critique associé à la transition liquide-liquide.
©Henry, L., Mezouar, M., Garbarino, G. et al.

POURQUOI COURBER UNE FEUILLE DE PAPIER LUI MET LA PRESSION

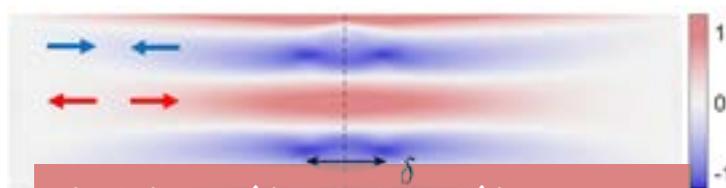
Des chercheurs ont montré dans quelles conditions courber une feuille de papier induit une compression qui la froisse comme si elle avait été chiffonnée entre les mains. Ces travaux ont été menés par une équipe du LOMA en collaboration avec l'ISM et la start-up Hap2U. Ils sont publiés dans la revue *Physical Review E*.

Thomas Barois, Chercheur CNRS

Laboratoire ondes et matière d'Aquitaine (LOMA, CNRS/Univ. Bordeaux)

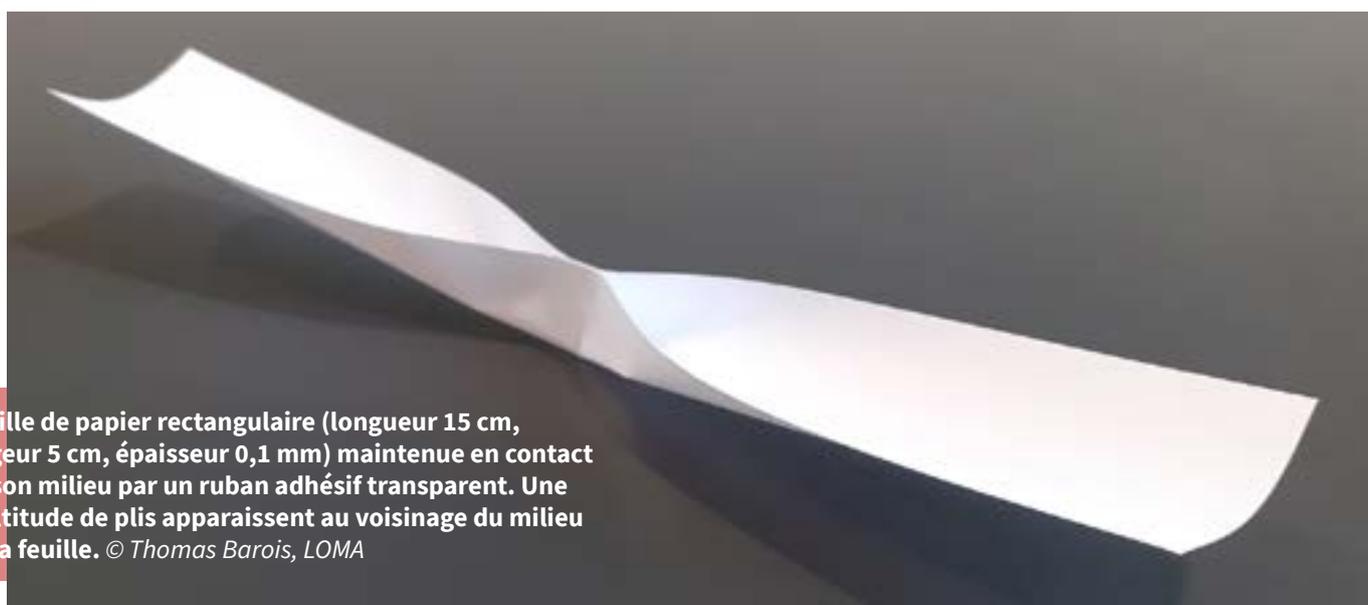
Institut des sciences du mouvement (ISM, CNRS/Univ. Aix-Marseille)

Transition to stress focusing for locally curved sheets. *Phys Rev E*. Publié le 09 juillet 2021.



Simulation numérique du champ d'étirement d'une feuille mince maintenue en contact aux extrémités de la ligne pointillée. Tout se passe comme s'il y avait un étirement (bandes rouges) et une compression (bandes bleues) appliquée à la feuille selon la direction longitudinale. Quand la compression dépasse une valeur critique, les plis apparaissent aux points de compression maximale (phénomène de focalisation des contraintes).

© Thomas Barois, LOMA



Feuille de papier rectangulaire (longueur 15 cm, largeur 5 cm, épaisseur 0,1 mm) maintenue en contact en son milieu par un ruban adhésif transparent. Une multitude de plis apparaissent au voisinage du milieu de la feuille. © Thomas Barois, LOMA

TAILLE RECORD POUR UN SUPRACRISTAL EN OR

En utilisant un dispositif microfluidique, des chercheurs et des chercheuses du LPS, en collaboration avec deux équipes espagnoles, ont synthétisé un supracristal de nanoparticules d'or de taille millimétrique, tout en visualisant au fur et à mesure sa croissance à l'aide de la diffusion des rayons X.

Ce travail a été publié dans la revue *Advanced Functional Materials*.

Cyrille Hamon, Chercheur au CNRS

Laboratoire de physique des solides à Orsay (LPS, CNRS/Université Paris-Saclay)

Structure and Formation Kinetics of Millimeter-Size Single Domain Supercrystals. *Advanced Functional Materials*. Publié le 22 avril 2021.

LA GRANDEUR DU CIMENT DANS LA PETITESSE DE SES PORES

Le ciment est le matériau le plus produit au monde et un acteur majeur des émissions de gaz à effet de serre. Le mystère de l'origine de son extraordinaire pouvoir de cohésion est éclairci grâce à de nouvelles approches théoriques et numériques, dégageant des pistes pour concevoir un matériau plus durable.

Une fois hydraté, le ciment est largement utilisé pour lier des matériaux de construction, notamment le béton, leur conférant des propriétés cohésives et mécaniques extraordinaires. Alors que comprendre l'origine de la cohésion du ciment est un enjeu majeur pour améliorer sa technologie et espérer réduire son impact climatique, jusqu'ici, la physique en jeu au sein du ciment était largement incomprise, les modélisations théoriques échouant à rendre compte de la force de cohésion d'un facteur 100 par rapport aux simulations numériques. Dans ce travail, en associant des simulations numériques 3D décrivant l'organisation des composants du ciment à l'échelle moléculaire et de nouveaux calculs analytiques, les chercheurs et les chercheuses ont montré que la force de cohésion est due aux interactions électrostatiques entre les ions, lesquelles sont très significativement augmentées par rapport aux prédictions en raison de leur confinement extrême avec l'eau dans des nanopores. Cette étude a été réalisée par des membres du LPTMS, du LMGC, de Georgetown University et du Massachusetts Institute of Technology. Elle est publiée dans la revue *Science Advances*.

À base de calcaire et d'argile, la pâte de ciment se forme par précipitation avec l'eau. Elle est principalement composée de silicate de calcium hydraté (C-S-H), présentant des pores nanométriques en forme de feuillets dont les surfaces sont chargées et dans lesquels des ions calcium solvatés sont confinés. Au cours de l'hydratation, les pores rétrécissent et le confinement augmente jusqu'au moment où la place manque pour accommoder toutes les molécules d'eau entourant habituellement les ions. Les ions s'associent alors avec l'eau dans des structures spécifiquement optimisées par le confinement. L'écrantage diélectrique dû à la solvatation disparaît, induisant des corrélations ioniques significativement plus fortes qu'on

ne le pensait auparavant et la formation d'une sorte de cristal d'ions enchevêtré de molécules d'eau (figure). Un nouveau modèle analytique prenant en compte la disparition de l'écrantage des interactions a été développé, qui prédit l'intensité de la cohésion de la pâte de ciment, cette fois en très bon accord avec les simulations numériques. De façon assez contre-intuitive, les feuillets de C-S-H s'attirent fortement, bien que portant des charges de même signe. Cette attraction, d'origine purement Coulombienne, est due à la présence d'ions de charge opposée dans l'espace inter-feuillets.

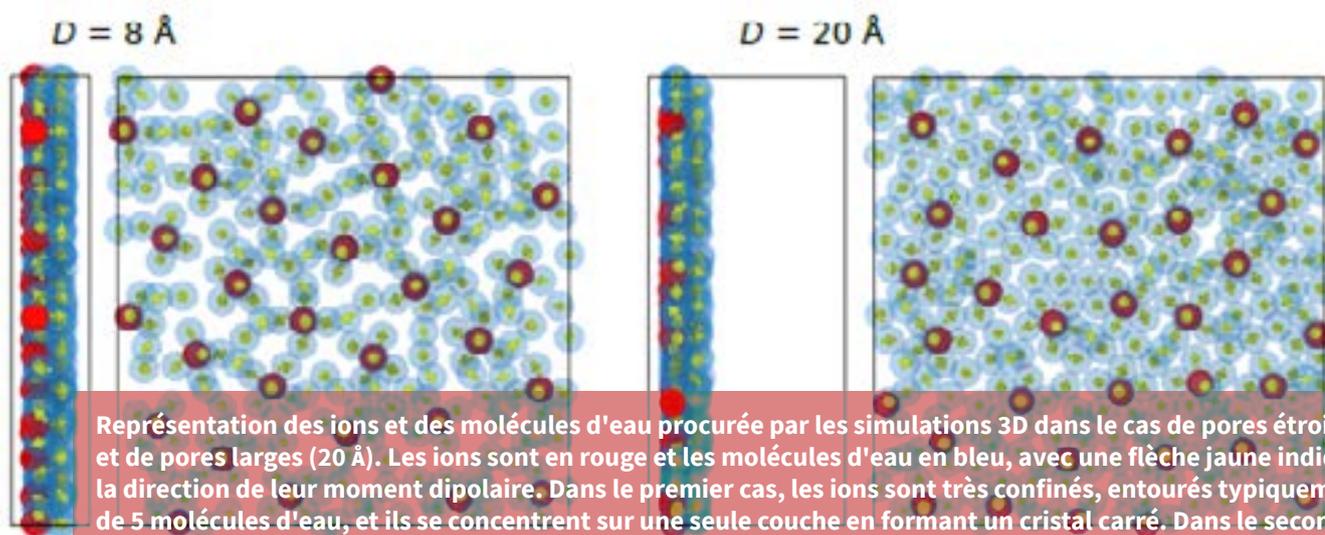
La compréhension de la physique fondamentale en jeu dans la cohésion du ciment procure des outils pour l'identification de paramètres clés tels que le type d'ions, leur charge ou le type de molécules du solvant, en vue de concevoir une pâte de ciment plus durable et des nouveaux matériaux de construction pour des infrastructures plus résilientes. Ces résultats intéressent aussi des applications dans d'autres domaines comme les colloïdes ou les membranes biologiques, quand sont réunies interactions électrostatiques et confinement.

Emmanuel Trizac, Enseignant-chercheur à l'Université Paris-Saclay

Laboratoire de physique théorique et modèles statistiques (LPTMS, CNRS/Univ. Paris-Saclay)

Laboratoire de mécanique et génie civil (LMGC, CNRS/Univ. Montpellier)

The physics of cement cohesion. *Science Advances*, Publié le 04 août 2021.



Représentation des ions et des molécules d'eau procurée par les simulations 3D dans le cas de pores étroits (8 Å) et de pores larges (20 Å). Les ions sont en rouge et les molécules d'eau en bleu, avec une flèche jaune indiquant la direction de leur moment dipolaire. Dans le premier cas, les ions sont très confinés, entourés typiquement de 5 molécules d'eau, et ils se concentrent sur une seule couche en formant un cristal carré. Dans le second cas, la dimension du pore est plus grande, il y a plus de molécules d'eau par ion et, en raison de l'écrantage des interactions coulombiennes, les ions ne sont plus ordonnés. ©Emmanuel Trizac, LPTMS

DES AIMANTS MINIATURES FABRIQUÉS À PARTIR DE NANOPARTICULES

En manipulant des nanobâtonnets de cobalt, des chercheurs et des chercheuses ont mis au point une technique de synthèse d'aimants microscopiques, dont ils contrôlent la géométrie et qu'ils peuvent déposer en un endroit précis d'une puce électronique.

Les résultats de l'étude sont publiés dans *ACS Nano*.

Lise-Marie Lacroix, Enseignante-chercheuse à l'Univ. de Toulouse Paul Sabatier

Laboratoire de physique et chimie des nano-objets (LPCNO, INSA Toulouse/Univ. Toulouse Paul Sabatier)
Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS, CNRS)

Magnetophoresis-Assisted Capillary Assembly: A Versatile Approach for Fabricating Tailored 3D Magnetic Supercrystals. *ACS Nano*. Publié le 23 février 2021

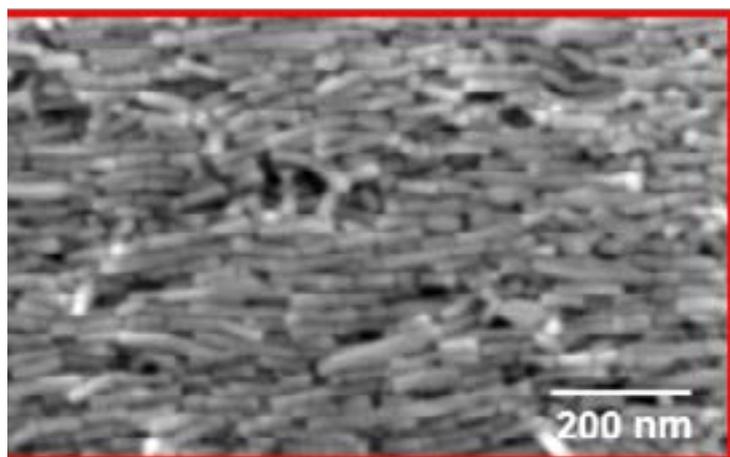
S'ÉVAPORER POUR AVANCER

Des chercheurs ont observé l'autopropulsion d'une goutte d'éthanol déposée sur de l'huile de silicone et ils ont expliqué les mécanismes de ce mouvement spontané. Les différences de température engendrées à l'interface entre la goutte et l'huile par l'évaporation de l'éthanol sont à l'origine de ce moteur miniature auto-entretenu. Ce phénomène d'autopropulsion a été mis en évidence et expliqué par une équipe de chercheurs de l'IPR et ces résultats sont publiés dans *Physical Review Letters*.

Benjamin Reichert, Post-doctorant à l'Université de Liège

Institut de Physique de Rennes (IPR, CNRS/Univ. Rennes 1)

Self-Propulsion of a Volatile Drop on the Surface of an Immiscible Liquid Bath. *Phys. Rev. Lett.* Publié le 28 septembre 2021.



À gauche, vue au microscope des bâtonnets de cobalt déposés après évaporation, de telle sorte à constituer un microaimant, entre deux plots de nickel (à droite).

© Lise-Marie Lacroix, LPCNO



DES ATOMES DE PHOSPHORE DÉPOSÉS EN CHAÎNE

Les matériaux de basse dimensionnalité, agencés en surface ou en chaîne, sont très étudiés pour leurs propriétés nouvelles et leur potentiel pour l'optoélectronique. C'est le cas des chaînes de phosphorène que les chercheurs fabriquent ici pour la première fois de façon contrôlée et reproductible par épitaxie par jet moléculaire sur une surface cristalline d'argent.

Cette étude est une collaboration de physiciens de l'ISMO, du SPEC et du synchrotron SOLEIL, en collaboration avec une équipe de l'Université Centrale de Floride. Elle est publiée dans la revue *Nature Communications*.

Hamid Oughaddou, Enseignant-chercheur à CY Cergy Paris Université

Institut des sciences moléculaires d'Orsay (ISMO, CNRS/Univ. Paris-Saclay)
Service de physique de l'état condensé (SPEC, CEA/CNRS)

Flat epitaxial quasi-1D phosphorene chains. *Nature Communications*, Publié le 27 Aout 2021.

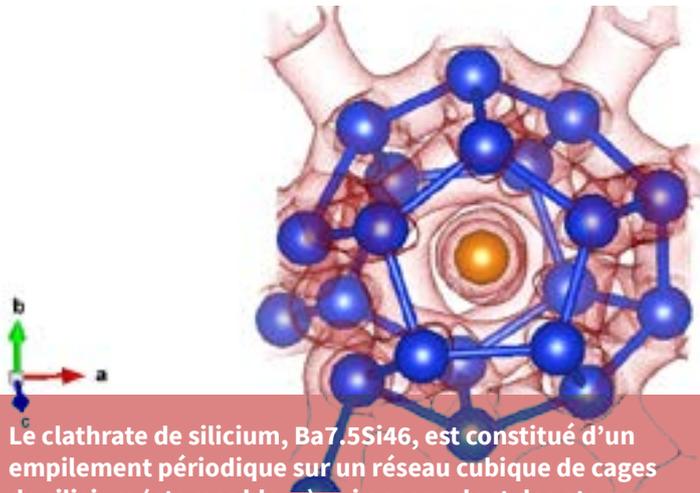
LES DÉFAUTS PLEINS D'AVANTAGES D'UN CRISTAL COMPLEXE

Le cristal de clathrate de silicium peut brusquement changer de volume lorsqu'il est soumis à une forte pression, sans pour autant modifier la structure de sa maille élémentaire. L'explication de ce phénomène vient d'être découverte par une équipe de chercheurs et chercheuses l'ILM à Lyon, en collaboration avec le Helmholtz Institute Ulm et l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) : elle se trouve dans la réorganisation des défauts du cristal. Leurs travaux sont publiés dans la revue *Acta Materialia*.

Stéphane Pailhès, Chercheur au CNRS
Denis Machon, Enseignant-chercheur à l'Université Lyon 1

Institut Lumière matière (ILM, CNRS / Université Claude Bernard Lyon 1)

Isostructural phase transition by point defect reorganization in the binary type-I clathrate Ba_{7.5}Si₄₅. *Acta Materialia*. Publié le 15 mai 2021.



Le clathrate de silicium, Ba_{7.5}Si₄₆, est constitué d'un empilement périodique sur un réseau cubique de cages de silicium (atomes bleus) qui encapsulent des atomes de baryum. A pression ambiante, la structure est stabilisée par la présence de lacunes de baryum laissant des cages de silicium vides. Sous l'effet de la pression, des atomes de silicium (jaunes) se retrouvent piégés dans les cages vides laissant des sites vacants sur les cages. En sautant au centre de la cage, la configuration électronique des atomes de silicium passent à une configuration quasi neutre (le drapé marron entourant les atomes représente la densité de charges électroniques). © Stéphane Pailhès et Denis Machon, ILM

QUAND LA DIFFRACTION X AUX TEMPS ULTRACOURTS RÉVÈLE QU'UNE TRANSITION VERS UNE PHASE MÉTALLIQUE EST PILOTÉE PAR UNE ONDE ÉLASTIQUE

L'excitation par une impulsion laser intense des matériaux conduit à des changements des propriétés électroniques qui sont couramment étudiés pour des temps ultracourts (femtosecondes ou picosecondes) via des méthodes optiques. Dans ce travail, grâce à l'utilisation d'impulsions de rayons X ultracourtes, les physiciennes et physiciens étudient pour la première fois les propriétés structurales associées en mesurant de façon quantitative les déplacements atomiques. Ils montrent que pour des nanocristallites d'oxyde de titane (Ti₃O₅), la transition du semiconducteur vers le métal se propage suivant un front d'onde élastique, à des temps beaucoup plus courts que les temps de mise à l'équilibre thermique.

Ces travaux, conduits par des chercheuses et chercheurs dans le cadre du laboratoire de recherche international franco-japonais LIA IM-LED, sont publiés dans la revue *Nature Communications*.

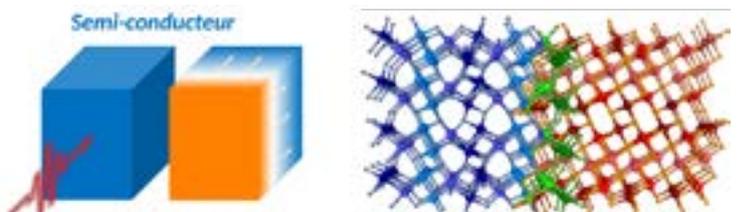
Céline Mariette, Chercheuse au CNRS

Institut de Physique de Rennes (IPR, CNRS/Univ. Rennes 1)

Strain wave pathway to semiconductor-to-metal transition revealed by time-resolved X-ray powder diffraction. *Nature Communications*, Publié le 23 février 2021.



Les sources pulsées utilisées dans ce travail: à gauche, le SwissFEL à Villigen en Suisse - crédit PSI/Markus Fischer ; à droite, l'European Synchrotron Radiation Facility à Grenoble © Markus Fischer, PSI; Denis MOREL, ESRF



à gauche, représentation schématique de l'excitation par le laser visible d'un nanocristallite de Ti₃O₅ et de la propagation du changement depuis l'état semiconducteur (en bleu) vers l'état métallique (en rouge-orangé) ; à droite, représentation du changement de structure atomique correspondant © International Associated Laboratory (LIA)

MESURE ET INSTRUMENTATION

FAIT MARQUANT

UN MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE ULTRARAPIDE ET LUMINEUX !

Relier les propriétés lumineuses et la structure d'un matériau à l'échelle du nanomètre donne accès à des informations précieuses pour le développement de dispositifs optoélectroniques. Des physiciennes et des physiciens ont pour la première fois mesuré en fonction du temps à l'échelle de la nanoseconde la lumière émise sous l'effet des électrons au sein d'un microscope électronique en transmission ultrarapide (UTEM). Ces travaux ouvrent la voie à une cartographie de la durée de l'émission de lumière avec une résolution spatio-temporelle inégalée.

L'excitation d'un matériau par des photons ou des électrons conduit parfois à l'émission de lumière : c'est le phénomène de luminescence. L'analyse de cette lumière, notamment son évolution temporelle, donne des informations précieuses sur le matériau. Dans le cas d'une excitation par des photons, l'analyse est faite avec une résolution spatiale de l'ordre du micromètre lorsqu'on utilise un microscope optique. En utilisant un microscope électronique à balayage, on atteint une résolution spatiale nanométrique et dans ce cas, l'excitation est produite par les électrons du faisceau du microscope : c'est le phénomène de cathodoluminescence. De plus, si on utilise un microscope électronique à transmission (TEM), on a accès à la structure atomique du matériau. Dans ce travail, les physiciennes et les physiciens ont utilisé le microscope électronique à transmission ultrarapide (UTEM) développé au CEMES à Toulouse, et, grâce à l'insertion près de l'échantillon d'un miroir parabolique de grande ouverture numérique développé au LPS à Orsay, ils ont collecté suffisamment de lumière pour enregistrer pour la première fois un signal de cathodoluminescence avec à la fois une résolution spatiale de l'ordre de la dizaine de nanomètres et une résolution temporelle inférieure à la nanoseconde. Ces travaux sont publiés dans la revue *Applied Physics Letters*.

Les chercheuses et les chercheurs ont étudié des agrégats de nanodiamants possédant des défauts cristallins, dits centres NV, dans lesquels un atome d'azote coexiste avec une lacune, c'est-à-dire un atome manquant. Alors que le diamant parfait est transparent, ces centres sont aussi

appelés centres colorés à cause de la couleur donnée par leur luminescence. Cette luminescence est transitoire et c'est sa durée de vie qui était plus particulièrement l'objet de l'étude. Celle-ci a ainsi été déduite de la mesure en fonction du temps du signal de cathodoluminescence. Pour réaliser les expériences, le faisceau d'électrons de l'UTEM a été pulsé avec des impulsions d'une durée de 400 femtosecondes ($4 \cdot 10^{-13}$ s) grâce à l'excitation de la source d'électrons du microscope, une pointe de tungstène, par un laser femtoseconde, puis focalisé sur un échantillon de nanodiamants. Le principal défi auquel les scientifiques ont dû faire face a été de distinguer le signal du bruit. En effet, le courant du faisceau d'électrons pulsé de l'UTEM est beaucoup plus faible que celui d'un TEM conventionnel, ce qui entraîne une diminution drastique du signal émis par l'échantillon. C'est pour cela que les chercheurs ont inséré dans l'objectif de ce microscope un miroir parabolique de grande ouverture numérique afin de collecter de façon efficace la lumière émise. Ils ont ainsi cartographié avec une résolution spatiale de 12 nm la durée de vie de l'excitation des centres colorés des nanodiamants, de l'ordre de 20 ns, avec une résolution temporelle inférieure à la nanoseconde (figure).

Mesurer ainsi de façon intégrée au sein d'un UTEM la structure atomique résolue spatialement et la cathodoluminescence résolue temporellement est très prometteur par exemple pour l'étude de l'émission de lumière dans des nanostructures semiconductrices : le rendement d'émission et la dynamique des porteurs de charge sont alors connectés localement aux propriétés structurales et reliés

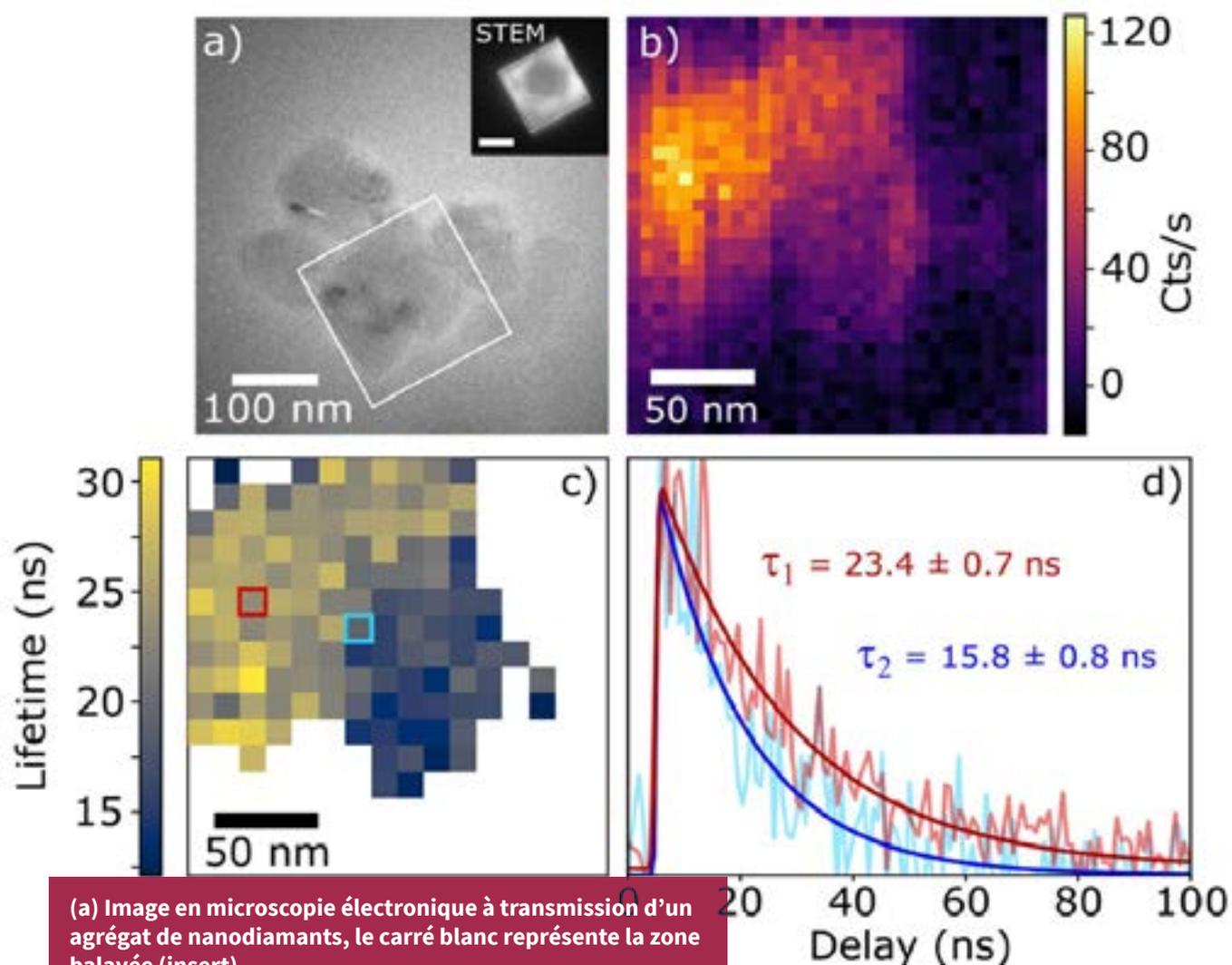
à des paramètres comme la concentration de dopants, les contraintes ou les champs électriques. Ceci est intéressant pour des applications aux dispositifs optoélectroniques tels que des photodétecteurs ou des sources de photons uniques.

Arnaud Arbouet, Chercheur au CNRS

Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales (CEMES, CNRS)

Laboratoire de physique des solides (LPS, CNRS / Univ. Paris-Saclay)

Time-resolved cathodoluminescence in an ultrafast transmission electron microscope. *Appl. Phys. Lett.*,
Publié le 11 août 2021



(a) Image en microscopie électronique à transmission d'un agrégat de nanodiamants, le carré blanc représente la zone balayée (insert).

(b) Cartographie de l'intensité de l'émission de cathodoluminescence.

(c) Cartographie de la durée de vie de l'émission de cathodoluminescence.

(d) Signal de cathodoluminescence résolu en temps détecté aux emplacements représentés par les carrés rouge et bleu en (c). Les traits non bruités représentent l'ajustement des données pour la détermination de la durée de vie.

© CEMES

EXPLORER LE NANOMONDE EN TROIS DIMENSIONS

Imaginez un cube sur lequel on projette de la lumière à l'aide d'une lampe de poche. Ce cube reflète la lumière d'une manière particulière et il suffit de le faire pivoter, ou de bouger la lampe, pour en examiner chaque aspect et en déduire des informations sur sa structure. Maintenant, imaginez que ce cube ne soit constitué que de quelques milliers d'atomes de haut, que la lumière ne soit détectable que dans l'infrarouge et que la lampe de poche soit le faisceau d'un microscope. Comment parvenir à examiner chaque face du cube ? C'est l'exploit que viennent de réussir des scientifiques du CNRS et de l'Université Paris-Saclay en obtenant la première image tridimensionnelle de la structure de la lumière dans le domaine de l'infrarouge au voisinage d'un nanocube. Leurs résultats sont publiés le 26 mars 2021 dans *Science*.

La microscopie électronique utilise un faisceau d'électrons pour illuminer un échantillon et créer une image très agrandie. Elle permet aujourd'hui d'obtenir des mesures toujours plus complètes de propriétés physiques, avec une résolution spatiale inégalée, jusqu'à visualiser des atomes individuellement. Chromatem, l'instrument de l'Equipex Tempos dédié à la spectroscopie, est l'un de ces microscopes nouvelle génération. Il sonde les propriétés optiques, mécaniques et magnétiques de la matière avec une très grande résolution, égale par seulement trois microscopes au monde.

Des scientifiques du CNRS et de l'Université Paris-Saclay, de l'université de Graz et de l'université technologique de Graz (Autriche) ont étudié avec Chromatem un nanocristal d'oxyde de magnésium. La vibration de ses atomes crée un champ électromagnétique, détecté uniquement dans le domaine de l'infrarouge moyen. Lorsque les électrons émis par le microscope rencontrent indirectement ce champ électromagnétique, ils perdent de l'énergie. En mesurant cette perte d'énergie, il est donc possible d'en déduire le contour du champ électromagnétique présent autour du cristal. Problème : ce type de microscopie ne permet d'obtenir que des images en deux dimensions. Comment visualiser tous les coins, les arêtes et les faces

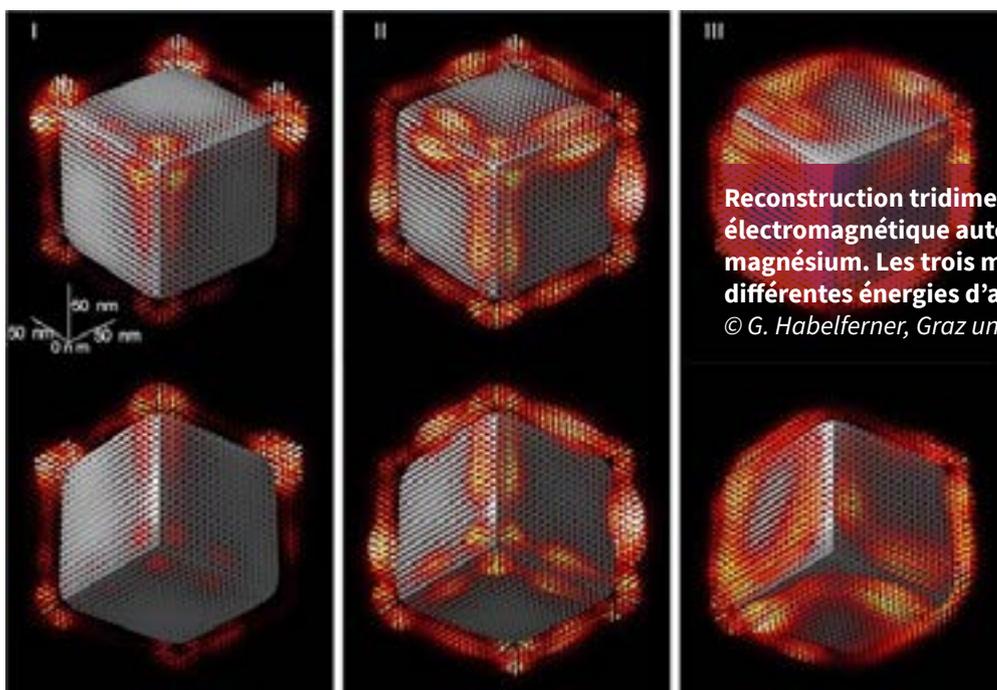
du cube ? Les scientifiques ont pour ce faire développé des techniques de reconstruction d'image qui permettent pour la première fois d'obtenir des images en trois dimensions du champ présent autour du cristal. Leur résultats sont publiés dans la revue *Science*. À terme, cela permettrait de cibler un point précis du cristal et de réaliser par exemple des transferts de chaleurs localisés.

Au-delà de l'oxyde de magnésium, de nombreux autres nano-objets absorbent de la lumière infrarouge, lors de transferts de chaleur par exemple, et il sera désormais possible d'imager ces transferts en trois dimensions. Une piste à explorer pour optimiser la dissipation de chaleur dans les composants toujours plus petits de la nanoélectronique.

Mathieu Kociak, Chercheur au CNRS

Laboratoire de physique des solides (CNRS / Université Paris-Saclay)

Three dimensional vectorial imaging of surface phonon polaritons. *Science*, Publié le 26 mars 2021.



Reconstruction tridimensionnelle du champ électromagnétique autour d'un nanocube d'oxyde de magnésium. Les trois modes (I, II, III) représentent différentes énergies d'absorption du nanocube.

© G. Habelerner, Graz univ.

MESURER LE MOUVEMENT BROWNIEN DE PARTICULES COLLOÏDALES CONFINÉES

Grâce à l'interférométrie optique, des chercheurs sont parvenus à mesurer les trajectoires de billes de polystyrène micrométriques en solution, à proximité d'une surface. L'analyse de ces trajectoires permet de déduire, avec une précision inédite, plusieurs paramètres physiques concernant ces colloïdes, leur dynamique et la surface voisine. Ces résultats sont publiés dans la revue *Physical review research*.

Yacine Amarouchene, Chercheur au CNRS

Thomas Salez, Chercheur au CNRS

Laboratoire ondes et matière d'Aquitaine (LOMA, CNRS / Université de Bordeaux)

Stochastic inference of surface-induced effects using Brownian motion. *Physical Review Research*, Publié le 8 Juillet 2021.



Vue d'artiste d'une bille de polystyrène éclairée (en blanc) par un faisceau lumineux qui vient d'en haut, avec la projection de la figure d'interférence en forme d'anneaux concentriques sur le plan du bas. © Pierre Savary

UN LOGICIEL LIBRE POUR UNE ACQUISITION SIMPLE DE DONNÉES COMPLEXES

PyMoDAQ, « Modular Data Acquisition with Python » est un logiciel libre pour l'acquisition automatique de données en fonction de paramètres expérimentaux multiples. Conçu pour être utilisé sans qu'il soit nécessaire de programmer, il possède une interface graphique générique pour le contrôle des instruments avec des extensions spécifiques qui lui assurent une grande modularité.

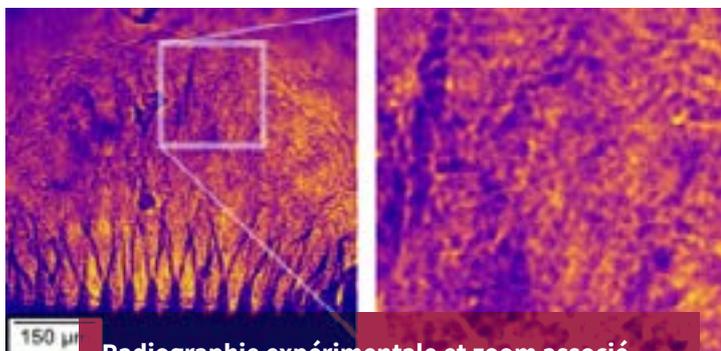
Les caractéristiques et les performances de ce logiciel développé par un ingénieur de recherche du CEMES sont Publiées dans *Review of Scientific Instruments*.

Sébastien Weber, Ingénieur de recherche au CNRS

Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales (CEMES, CNRS)

PyMoDAQ: An open-source Python-based software for Modular Data Acquisition. *Review of Scientific Instruments*, Publié le 8 avril 2021.

LA TURBULENCE D'UN PLASMA DENSE OBSERVÉE À L'ÉCHELLE MICROSCOPIQUE



Radiographie expérimentale et zoom associé montrant en fausses couleurs une zone turbulente apparaissant 60 ns après l'impulsion laser ayant créé le plasma. © Michel Koenig, LULI

En radiographiant grâce au faisceau X d'un laser à électrons libres un plasma généré par un laser de puissance, les chercheurs ont pour la première fois observé le régime turbulent d'un plasma dense avec une résolution spatiale exceptionnelle de l'ordre d'un micromètre.

Ces travaux, menés au sein d'une collaboration internationale, sont publiés dans la revue *Nature Communications*.

Michel Koenig, Chercheur au CNRS

Gabriel Rigon, Post-doctorant à Nagoya University

Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI, CNRS/Ecole polytechnique/Sorbonne Univ./CEA)
Centre lasers intenses et applications (CELIA, CNRS/CEA/Univ. Bordeaux)

Direction des Applications Militaires (DAM, CEA)

Stochastic inference of surface-induced effects using Brownian motion. *Physical Review Research*, Publié le 11 mai 2021.

UNE SONDE HAUTE RÉOLUTION POUR VOIR ET RECONNAÎTRE LES ATOMES

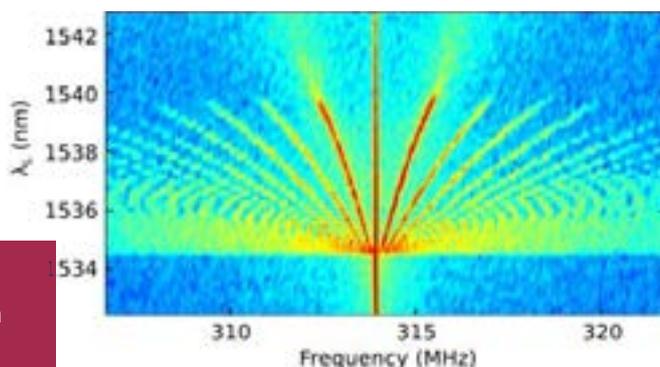
En utilisant des impulsions électriques dans le domaine térahertz, des scientifiques sont parvenus à augmenter la résolution des sondes atomiques tomographiques utilisées pour analyser chimiquement métaux, semi-conducteurs et biomatériaux. Ces résultats sont publiés dans la revue *Sciences Advances*.



2 μm

À gauche, image de microscopie électronique d'un microrésonateur AsGa (disque de rayon entre 2 et 5 μm et épaisseur 200 nm). Un piédestal (gris sombre) en AsGaAl soutient le disque.

À droite, fréquences mécaniques générées au sein d'un microrésonateur enregistrées en fonction de la longueur d'onde du laser. Les "dents" du peigne s'écartent quand la longueur d'onde augmente. © Ivan Favero, MPQ



d'un peigne de fréquences optiques, d'intérêt pour la métrologie des forces. Ces résultats sont publiés dans *Physical Review Letters*.

UN PEIGNE MÉCANIQUE DE FRÉQUENCES CONTRÔLÉ PAR LA LUMIÈRE

Concentrée dans un microrésonateur, l'énergie se transfère efficacement entre plusieurs formes : optique, mécanique, électronique et thermique. Les chercheurs ont utilisé ces quatre formes d'énergie pour donner naissance à un mouvement mécanique impulsif stable à ultra-haute fréquence, l'analogue mécanique

DES IMPULSIONS D'ATOMES D'ANTIHYDROGÈNE POUR MESURER LA GRAVITÉ

Mesurer la gravité à laquelle est soumise l'antimatière est un des défis actuels, avec pour enjeu de tester les lois fondamentales de la physique. Dans le cadre de la collaboration AEGIS au CERN, les physiciens et les physiciennes ont formé pour la première fois des atomes d'antihydrogène en mode pulsé, avec une précision temporelle inégalée de 250 ns, une étape majeure qui permettra de manipuler ces atomes et de mesurer avec précision l'accélération à laquelle est soumis l'antihydrogène sous l'effet de la gravitation terrestre.

Ivan Favero, Chercheur au CNRS

Matériaux et phénomènes quantiques (MPQ, Université de Paris/CNRS)
Centre des nanosciences et nanotechnologies (C2N, Université Paris-Saclay/CNRS)

Electro-Opto-Mechanical Modulation Instability in a Semiconductor Resonator. *Physical Review Letters*, Publié le 17 juin 2021.

Ce résultat, issu d'une large collaboration internationale, est publié dans la revue *Communications Physics*.

Daniel Comparat, Chercheur au CNRS
Patrick Nédélec, Enseignant-chercheur à l'Université Claude Bernard Lyon 1

Laboratoire Aimé Cotton (LAC, CNRS/Univ Paris Saclay)
Laboratoire Kastler Brossel (LKB, CNRS/Sorbonne Univ/ENS Paris/Collège de France)
Institut de physique des deux Infinis de Lyon (IP2I Lyon, CNRS/Univ. Claude Bernard Lyon 1)

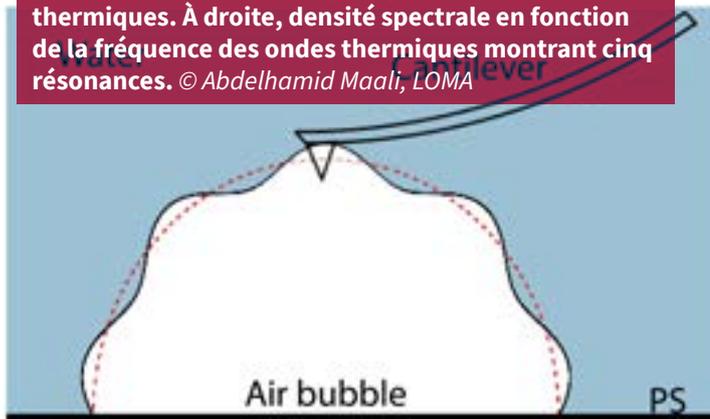
Pulsed production of antihydrogen. *Communications Physics*. Publié le 08 février 2021.

MESURER LES FLUCTUATIONS THERMIQUES D'UNE BULLE D'AIR

Grâce à un microscope à force atomique utilisé comme un microlevier, des chercheurs ont réalisé pour la première fois une mesure directe des fluctuations thermiques à l'interface d'une bulle d'air et de l'eau.

Cette étude est publiée dans *Physical Review Letters*.

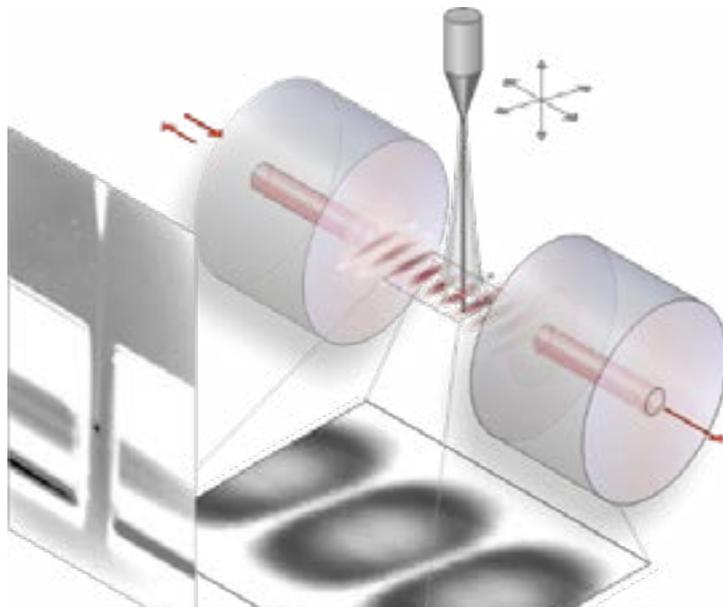
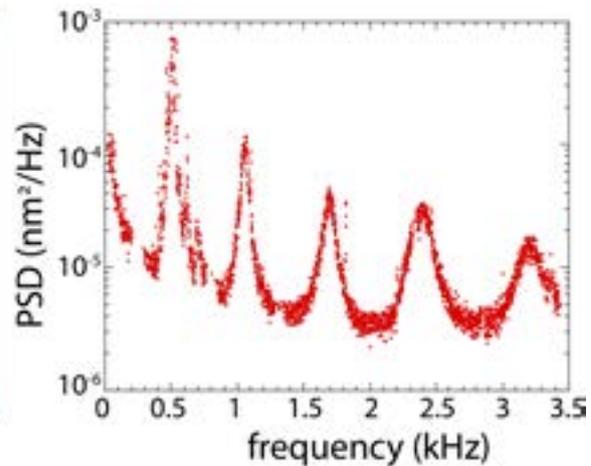
À gauche, dispositif expérimental : le microlevier du microscope à force atomique suit la trace de l'interface air-eau sculptée par les ondes thermiques. À droite, densité spectrale en fonction de la fréquence des ondes thermiques montrant cinq résonances. © Abdelhamid Maali, LOMA



Abdelhamid Maali, Chercheur au CNRS

Laboratoire ondes et matière d'Aquitaine (LOMA, CNRS/Univ. Bordeaux)

Near-Field Probe of Thermal Fluctuations of a Hemispherical Bubble Surface. *Physical Review Letters*, Publié le 30 avril 2021.



Le champ lumineux associé à un seul photon peuplant le mode optique confiné entre les miroirs d'une microcavité optique est cartographié grâce à la force qu'il exerce sur une sonde nano-mécanique ultrasensible, des nanofils de carbure de silicium de diamètre inférieur à la longueur d'onde. Cette carte représente l'intensité lumineuse diffusée hors de la cavité en fonction de la position du nanofil et permet d'identifier les endroits dans la cavité où l'action de la lumière sur le nanofil sera maximale. © Olivier Arcizet, NEEL.

CARTOGRAPHIER MÉCANIQUEMENT LE CHAMP LUMINEUX DE PHOTONS CONFINÉS

En cartographiant avec une sonde de force nano-mécanique le champ lumineux dans une cavité optique, des chercheurs ont pu étudier l'action de la lumière sur des nano-fils de 100 nm de diamètre. L'optomécanique en cavité permet ainsi de mesurer de très petites déformations et de tester les limites ultimes de sensibilité de la mesure, lorsqu'elle se heurte à la nature quantique de la lumière. Ces résultats sont publiés dans *Physical Review X*.

Olivier Arcizet, Chercheur au CNRS

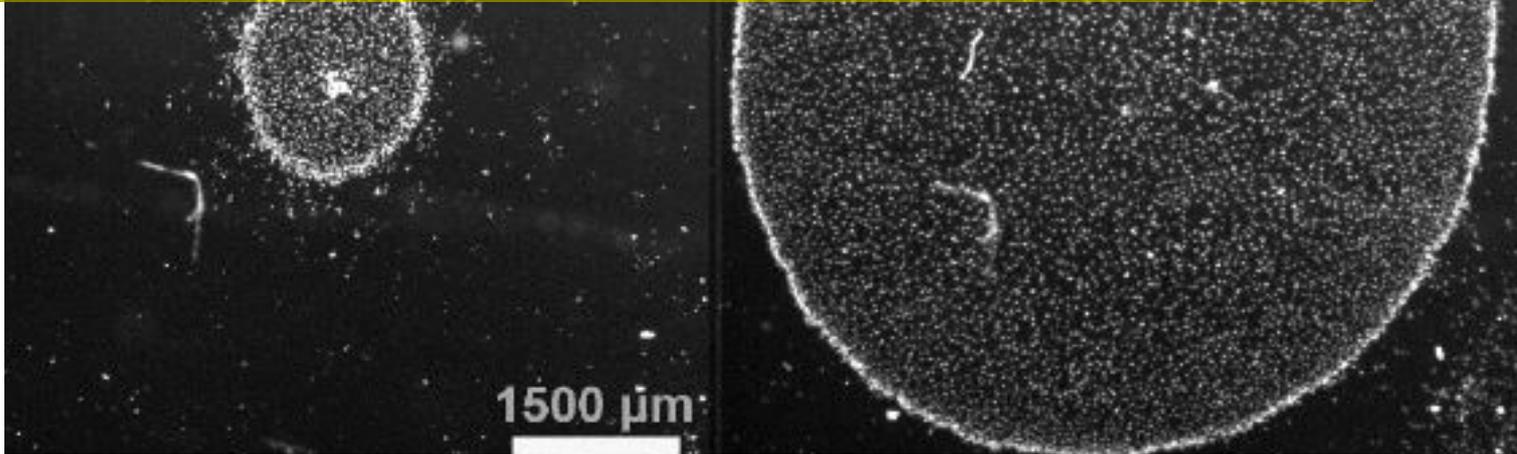
Jakob Reichel, Enseignant-chercheur à Sorbonne Université

Institut Néel (NEEL, CNRS/Univ. Grenoble Alpes/Grenoble INP)

Laboratoire Kastler Brossel (LKB, CNRS/Sorbonne Univ./ENS Paris/Collège de France)

Mapping the Cavity Optomechanical Interaction with Subwavelength-Sized Ultrasensitive Nanomechanical Force Sensors. *Physical Review X*, *American Physical Society 11*, Publié le 8 avril 2021.

PHYSIQUE ET BIOLOGIE - BIOINSPIRATION



FAIT MARQUANT

COMMENT LA FLEXION DES CILS DÉTECTE DES PARTICULES EN SUSPENSION

Dans le vivant, les cils sont des capteurs extrêmement sensibles pour la perception. En mimant la mécanique des cils en laboratoire, les physiciens analysent pour la première fois leur remarquable capacité à détecter des particules en suspension dans le milieu liquide environnant.

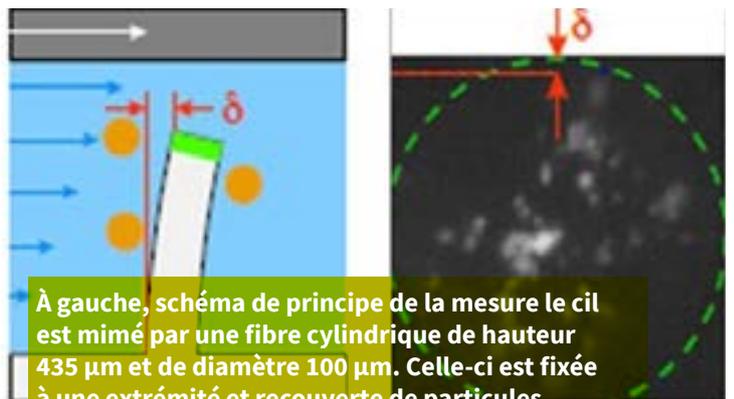
Chez la plupart des animaux et des micro-organismes, les sens de l'ouïe, de l'odorat et du toucher impliquent des protubérances cellulaires allongées appelées cils. Sous l'effet de l'écoulement d'un fluide, ces cils fléchissent et déclenchent la réponse de récepteurs spécifiques enfouis proche de leur base. Le cil joue ainsi le rôle d'un capteur mécanique et est la première étape dans l'information perceptive. Par exemple, en laboratoire, l'amplitude de flexion d'un cil sous l'écoulement d'un liquide homogène fournit une mesure directe de la viscosité de ce liquide. Dans des environnements naturels cependant, le liquide dans lequel baigne les cils n'est généralement pas homogène, à cause de la présence de particules ou d'autres micro-organismes. Afin de comprendre la sensibilité des cils à cet environnement complexe, les chercheurs et chercheuses ont mimé leur comportement mécanique en étudiant un cil artificiel, une fibre élastique fixée à une extrémité, soumise à l'écoulement de suspensions granulaires (figure). En combinant des expériences d'imagerie de fluorescence et des modélisations théoriques, ils montrent que, si la flexion moyenne de la fibre résulte de l'écoulement continu du liquide, ses fluctuations résultent principalement des contacts entre la fibre et les particules en suspension, et sont directement reliées à leur concentration. Les résultats suggèrent de plus que les cils biologiques pourraient détecter des particules aussi petites que leur diamètre. Ces études ont été conduites par le Laboratoire Jean Perrin (LJP, CNRS/Sorbonne Univ.) en collaboration avec les centres de recherche de Nestlé à Lisieux et à Lausanne, et sont publiées dans la revue *PNAS*. Elles fournissent le cadre mécanique et statistique pour décrire la sensibilité des cils biologiques aux particules présentes dans leur environnement.

Alexis M. Prevost, Chercheur au CNRS

Elie Wandersman, Enseignant-chercheur à Sorbonne Université

Laboratoire Jean Perrin (LJP, CNRS/Sorbonne Univ.)

A bending fluctuation-based mechanism for particle detection by ciliated structures. *PNAS*, Publié le 3 août 2021.



À gauche, schéma de principe de la mesure le cil est mimé par une fibre cylindrique de hauteur $435 \mu\text{m}$ et de diamètre $100 \mu\text{m}$. Celle-ci est fixée à une extrémité et recouverte de particules fluorescentes (en vert) à son extrémité libre. Sous l'effet du flux hydrodynamique représenté par les flèches bleues et des chocs avec les particules en suspension (en orange), le cil fléchit avec une amplitude d . À droite, image par microscopie d'épifluorescence de l'extrémité libre de la fibre (vue de dessus). Le cercle en pointillé vert représente la section de la fibre et la flexion d est mesurée par le déplacement de ce cercle sous l'effet du flux hydrodynamique. ©Prevost, LJP

DÉPISTAGE DU COVID-19 : UN NOUVEAU MODÈLE POUR ÉVALUER L'EFFICACITÉ DES TESTS GROUPÉS

Comment déterminer l'efficacité d'une stratégie de dépistage du virus SARS-CoV-2 utilisant des tests groupés - autrement dit le fait de regrouper les prélèvements issus de plusieurs individus pour n'effectuer qu'un seul test RT-PCR sur l'ensemble ? Pour ce faire, des scientifiques du CNRS, de l'université Grenoble Alpes et de l'université Sorbonne Paris Nord ont développé un modèle évaluant l'efficacité de ces tests. Leur étude, théorique, prend en compte l'effet de dilution et les limites de détection du test RT-PCR afin d'évaluer le nombre de faux négatifs potentiels en fonction de la taille de l'échantillon regroupé, d'optimiser la taille des groupes pour minimiser un risque épidémique, et de mieux déterminer le nombre de personnes contaminées dans une population donnée. Elle est publiée le 4 mars 2021 dans PLOS Computational Biology.

Mathématiquement, le principe des tests groupés est simple : plutôt que de tester cent prélèvements (un par individu), on peut rassembler ceux-ci en dix groupes de dix et réaliser un test pour chacun des groupes formés. Si le résultat du test d'un échantillon groupé est positif, alors au moins un des prélèvements du groupe contient l'agent infectieux. Inversement, un résultat négatif devrait indiquer, en principe, qu'aucun des prélèvements mélangés ne contient l'agent infectieux.

Moins coûteuse, plus rapide, cette méthode peut conduire à un résultat faussement négatif si le mélange induit une dilution telle que la quantité de virus dans l'échantillon testé devient inférieure à la limite de détection du test. Pour évaluer l'efficacité d'un dépistage s'appuyant sur une stratégie de tests groupés, un physicien et deux mathématiciens membres de la plateforme MODCOV19 ont mis au point un modèle mathématique estimant cet effet de dilution selon la taille du groupe d'échantillons. Ce modèle permet ainsi de quantifier la réduction de la sensibilité des tests et donc la capacité de tests groupés de plus ou moins grande taille à détecter la présence d'un individu contagieux.

Contrairement aux méthodes qui visent à minimiser le nombre de tests nécessaires pour établir un diagnostic individuel du ou des individus contaminés, la question centrale de la publication porte sur l'optimisation d'une stratégie de dépistage collective : comment optimiser la taille des groupes afin de dépister un nombre maximum d'individus tout en limitant le risque de faux-négatifs ?

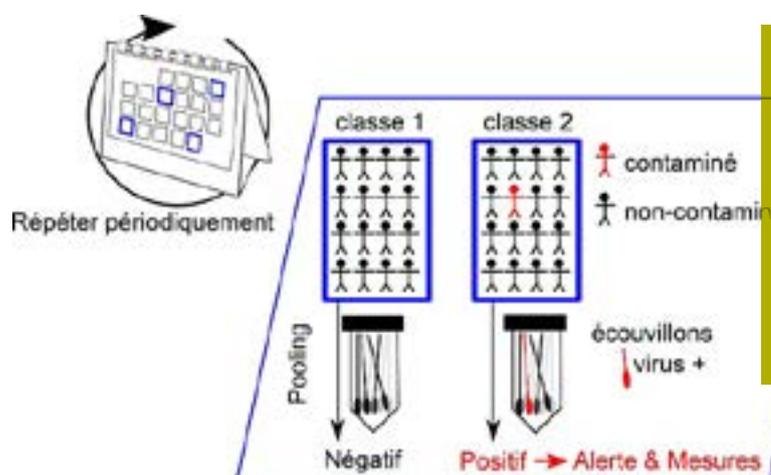
Les auteurs présentent également une méthode d'estimation précise de la proportion d'individus infectés dans la population testée (appelée la prévalence) pouvant guider l'application de mesures de prévention du risque épidémique.

Selon leur étude, les tests groupés seraient particulièrement intéressants pour évaluer rapidement et régulièrement la présence du SARS-COV-2 dans des communautés "fermées" (type Ehpad ou résidence universitaire). Ce type de tests a par exemple été mis en œuvre dans plusieurs institutions de recherche dans le monde, dont les 64 campus de la State University of New York (Etats-Unis), l'université de Liège en Belgique, ou encore l'université de Nottingham (Royaume-Uni), et ils ont permis une identification précoce de foyers épidémiques naissants.

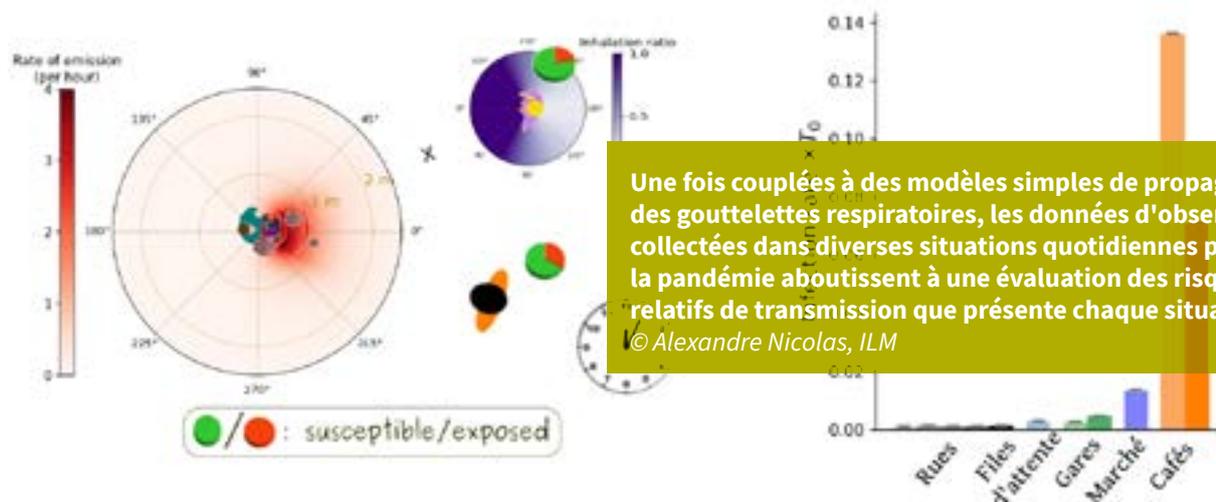
Jean-François Rupprecht, Chercheur au CNRS

Centre de physique théorique (CNRS/Aix-Marseille Université/Université de Toulon)

Group testing as a strategy for COVID-19 epidemiological monitoring and community surveillance. PLOS Computational Biology, Publié le 4 mars 2021



Pooling dans un cadre scolaire / universitaire : des prélèvements de salive ou de nez d'élèves partageant une même classe / une même résidence étudiante sont réunis dans un seul tube; le statut virologique du mélange est évalué par un seul test moléculaire (RT-qPCR ou RT-LAMP). Un test positif indique qu'au moins un individu est infecté par le CoV2-SARS, ce qui permet de prendre des mesures précoces pour endiguer une épidémie. L'opération de dépistage peut être répétée régulièrement. ©Jean-François Rupprecht, CPT



Une fois couplées à des modèles simples de propagation des gouttelettes respiratoires, les données d'observation collectées dans diverses situations quotidiennes pendant la pandémie aboutissent à une évaluation des risques relatifs de transmission que présente chaque situation.

© Alexandre Nicolas, ILM

COMMENT ESTIMER DES RISQUES DE TRANSMISSION DU SARS-COV-2 DANS DES FOULES EN EXTÉRIEUR

Grâce à des modèles de transmission virale, des chercheurs en physique statistique ont évalué les risques de transmission du SARS-CoV-2 responsable de la Covid-19, au sein de foules, sans port de masque, dans des milieux non confinés, et ils ont établi un classement objectif des situations selon leur risque de nouvelles contaminations. Ces travaux sont publiés dans la revue *Safety Science*.

Alexandre Nicolas, Chercheur au CNRS

Institut lumière matière (ILM, CNRS/Univ. Claude Bernard)

Model-based assessment of the risks of viral transmission in non-confined crowds. *Safety Science*, publié le 5 septembre 2021

DES PELURES D'OIGNON POUR MANIPULER LES ULTRASONS

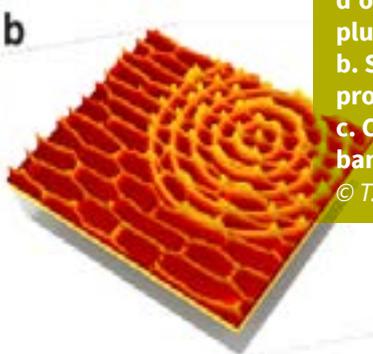
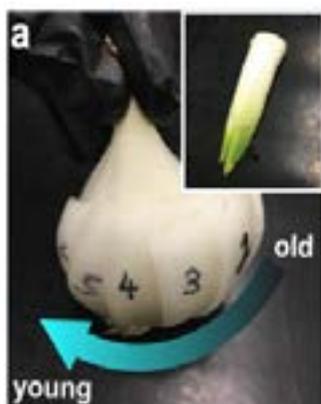
Sous l'impulsion de l'ILM, des scientifiques ont démontré que les épidermes d'oignons permettent de manipuler des ondes acoustiques à haute fréquence.

Ces propriétés, observées pour la première fois dans des matériaux d'origine végétale, pourraient déboucher sur des dispositifs électroniques bon marché et respectueux de l'environnement. Ces travaux sont publiés dans la revue *Applied Materials Today*.

Thomas Dehoux, Chercheur au CNRS

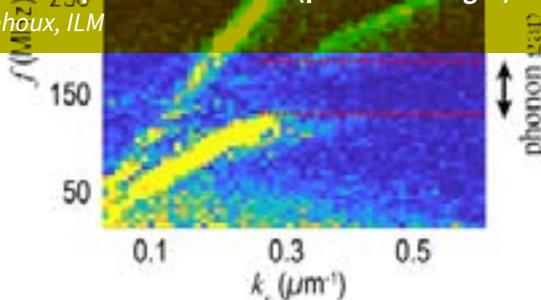
Institut lumière matière (ILM, CNRS/Univ. Claude Bernard)

Growing Phenotype-controlled Phononic Materials from Plant Cells Scaffolds. *Applied Materials Today*, publié le 20 janvier 2021



a. Vue des couches épidermiques qui ont été sélectionnées à différentes profondeurs d'un bulbe d'oignon, allant de la plus externe (la plus ancienne) à la plus profonde (la plus jeune).
b. Surface de l'épiderme de l'oignon sur laquelle la propagation des ondes de surface est illustrée.
c. Courbe de dispersion montrant l'apparition d'une bande de fréquences interdites (pointillés rouges).

© T. Dehoux, ILM



COMMENT LA PRESSION LIMITE LES TUMEURS

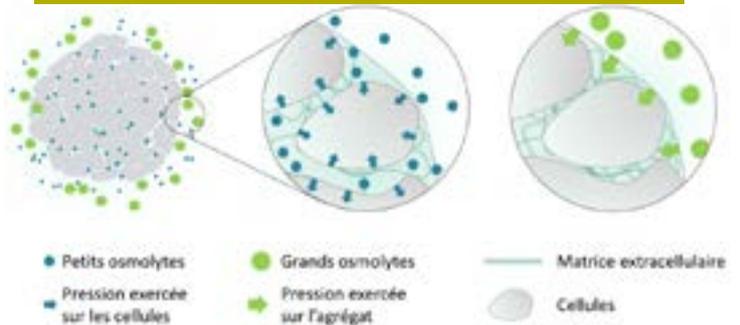
Anciennement, les médecins avaient remarqué qu'une légère compression mécanique limitait parfois la croissance des tumeurs. Des siècles plus tard, un effet similaire a été observé *in vitro* : des agrégats de cellules tumorales grossissent moins vite lorsqu'ils sont soumis à une faible pression (quelques kPa). Pour quelle raison ? Une équipe de chercheurs du CNRS, en collaboration avec le Collège de France a mis en évidence la façon dont l'application d'une pression mécanique sur des cellules tumorales limite leur croissance. Ces travaux sont publiés dans la revue *eLife*.

Giovanni Cappello, Chercheur au CNRS

Laboratoire interdisciplinaire de physique (LiPhy, CNRS/Univ. Grenoble Alpes)

Institut lumière matière (ILM, CNRS/Univ. Claude Bernard)

L'utilisation d'osmolytes de tailles différentes permet de sélectionner le site où s'exerce la pression, cellules ou matrice extracellulaire, et observer ainsi ces effets. © Giovanni Cappello, LiPhy.



Extracellular matrix in multicellular aggregates acts as a pressure sensor controlling cell proliferation and motility. *eLife*, publié le 11 mars 2021.

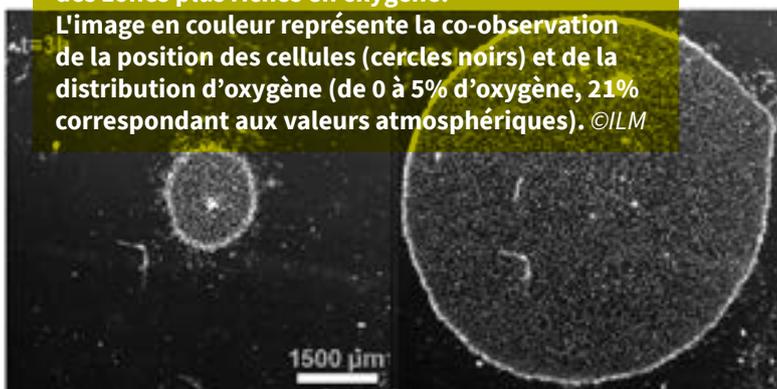
DES AMIBES EN MOUVEMENT À LA RECHERCHE D'OXYGÈNE

En combinant expériences biologiques, développements technologiques et modélisation mathématique, des chercheurs ont mis en lumière la façon dont les amibes sociales réagissent à un manque d'oxygène : elles forment un anneau dense de cellules, s'élargissant jusqu'à retrouver un environnement favorable, mais sans communiquer entre elles.

Ces travaux interdisciplinaires, réalisés en collaboration avec l'Université de Tohoku à Sendai, sont publiés dans la revue *eLife*.

L'image en noir et blanc montre l'anneau de cellules, déjà apparent après 3h (à gauche), et s'étendant tout en avançant à vitesse constante sur des temps très longs (ici 2 jours, à droite) vers des zones plus riches en oxygène.

L'image en couleur représente la co-observation de la position des cellules (cercles noirs) et de la distribution d'oxygène (de 0 à 5% d'oxygène, 21% correspondant aux valeurs atmosphériques). ©ILM



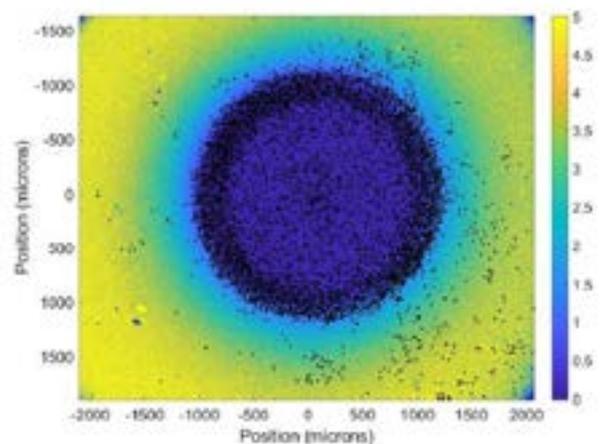
Olivier Cochet-Escartin, Chercheur au CNRS

Institut lumière matière (ILM, CNRS/Univ. Claude Bernard)

Centre de recherche en cancérologie de Lyon (CRCL, INSERM/CNRS/ Univ. Claude Bernard Lyon 1)

Institut Camille Jordan (IJC, CNRS/Univ. Jean Monnet/ Univ. Claude Bernard Lyon 1/École Centrale de Lyon/ Institut national des sciences appliquées de Lyon)

Hypoxia triggers collective aerotactic migration in Dictyostelium discoideum. *eLife*, Publié le 20 août 2021.



PHYSIQUE ET SYSTÈMES QUANTIQUES

ALERTE PRESSE

DE NOUVEAUX MOYENS VIABLES DE STOCKER L'INFORMATION POUR LES TECHNOLOGIES QUANTIQUES ?

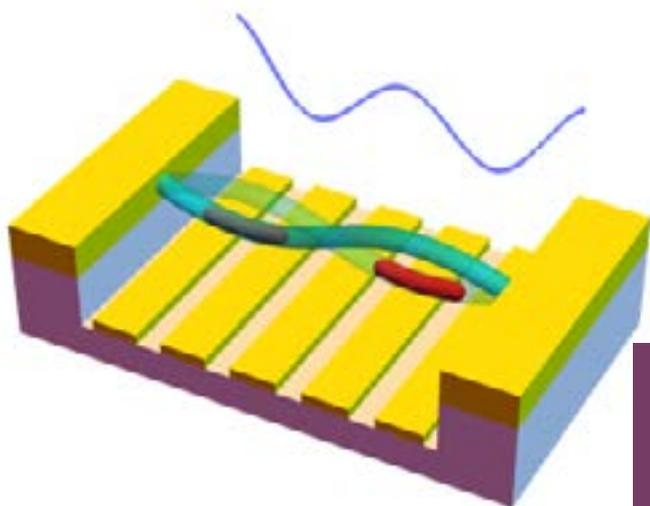
L'information quantique pourrait être à l'origine de la prochaine révolution technologique. Par analogie avec le bit dans l'informatique classique, le qubit est l'élément de base de l'informatique quantique. Mais démontrer l'existence de cette unité de stockage de l'information et l'utiliser est encore complexe et donc limité. Dans une étude publiée le 3 août 2021 dans *Physical Review X*, une équipe de recherche internationale, composée par Fabio Pistolesi, chercheur du CNRS et de deux chercheurs étrangers, a réussi par des calculs théoriques à montrer qu'il est possible de réaliser un nouveau type de qubit où l'information est stockée dans l'amplitude d'oscillation d'un nanotube de carbone. En effet, ces nanotubes sont capables d'effectuer un grand nombre d'oscillations sans s'estomper, ce qui montre leur faible interaction avec l'environnement et en fait d'excellents qubits potentiels. Cette propriété permettrait une plus grande fiabilité dans le calcul quantique. Cependant, un problème persistait dans la lecture et l'écri-

ture de l'information stockée dans les deux premiers niveaux d'énergie de ces oscillateurs. Les scientifiques ont réussi à prouver qu'il est possible de lire cette information en exploitant le couplage entre les électrons, une particule chargée négativement, et le mode de flexion de ces nanotubes. Cela permet de changer suffisamment l'espacement entre les premiers niveaux d'énergie et de les rendre ainsi accessibles indépendamment des autres niveaux pour lire l'information qu'ils contiennent. Il reste désormais à vérifier expérimentalement ces prédictions théoriques prometteuses.

Fabio Pistolesi, Chercheur au CNRS

Laboratoire ondes et matières d'Aquitaine (LOMA, CNRS/Université de Bordeaux)

Proposal for a Nanomechanical Qubit. *Physical Review X*. Publié le 03 août 2021.



Représentation du mode de flexion d'un nanotube représenté ici en bleu turquoise, et des emplacements des électrons en rouge et en marron dans le tube. © Fabio Pistolesi, LOMA

DES DÉFAUTS FLUORESCENTS QUANTIQUES OBSERVÉS POUR LA PREMIÈRE FOIS À L'ÉCHELLE INDIVIDUELLE DANS DU SILICIUM

Le silicium employé dans les composants électroniques comporte des imperfections cristallines qui peuvent se révéler utiles dans le domaine des technologies quantiques. Pour la première fois, des défauts luminescents y ont été observés à l'échelle individuelle avec, de plus, une émission de lumière dans la gamme des longueurs d'onde des télécommunications par fibre optique. Ces émetteurs apparaissent comme des candidats prometteurs pour concevoir des composants pour la photonique quantique intégrée du silicium et les communications quantiques.

Les matériaux semiconducteurs, et en particulier le silicium, jouent un rôle crucial dans le développement de la microélectronique. Leur structure cristalline présente parfois des défauts capables de confiner les charges électriques en un point précis, leur conférant des propriétés quantiques. Ces défauts peuvent alors se comporter comme des atomes artificiels, émettant chacun des photons de fluorescence un par un quand ils sont excités par un laser. Cette émission de photons uniques ne peut cependant être observée que si ces émetteurs sont isolés à l'échelle individuelle. Jusqu'ici, les défauts individuels détectés par voie optique provenaient uniquement de semiconducteurs à large bande interdite : diamant, carbure de silicium ou encore nitrure de bore hexagonal. Extrêmement prisé pour concevoir des composants électroniques et photoniques, le silicium présente une bande interdite jugée auparavant trop faible pour héberger des défauts suffisamment brillants pour être détectables de façon individuelle. Des chercheurs et chercheuses du CNRS, ainsi que des universités de Leipzig (Allemagne) et d'Oslo (Norvège), ont cependant isolé les premiers défauts fluorescents individuels dans le silicium. La luminescence de ces atomes artificiels est de plus comprise dans la gamme de longueurs d'onde des télécommunications, compatible avec des grandes distances de propagations dans des fibres optiques. Leurs résultats sont publiés dans la revue *Nature Electronics*.

Pour y parvenir, les scientifiques ont créé des défauts ponctuels dans un échantillon ultrapur de silicium sur isolant, grâce à un procédé d'implantation carbone suivi par un recuit rapide de la matrice. Un microscope confocal à froid (10 K) a été optimisé pour isoler et détecter le faible signal provenant d'émetteurs individuels de lumière dans le proche infrarouge. Les scans optiques de l'échantillon permettent de repérer des points chauds de photoluminescence, associés à des défauts individuels émettant aux longueurs d'ondes télécom. L'émission de photons uniques est vérifiée en analysant leur lumière au moyen d'outils issus de l'optique quantique. Incorporés dans des puces photoniques silicium, ces défauts pourraient apporter de nouvelles fonctionnalités pour la photonique quantique intégrée, en utilisant leurs photons uniques comme support d'information. Les chercheurs vont à présent poursuivre leurs expériences en ajoutant de l'excitation magnétique, afin d'essayer de contrôler l'état de spin de ces atomes artificiels dans le but d'obtenir un stockage quantique de l'information. L'objectif à plus long terme serait de développer dans le silicium des mémoires quantiques interfacées avec des photons uniques télécom. Une telle réalisation pourrait ouvrir de nombreuses perspectives pour le potentiel déploiement de réseaux de communication quantique.

Anaïs Dréau, Chercheuse au CNRS

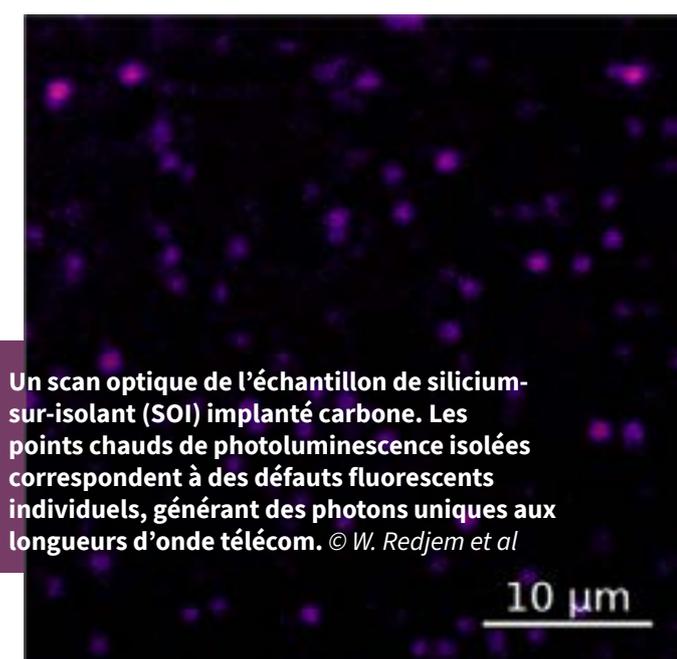
Laboratoire Charles Coulomb (L2C, CNRS / Université de Montpellier)

Institut matériaux microélectronique nanosciences de Provence (IM2NP, CNRS / Aix-Marseille Université)

Institut des nanotechnologies de Lyon (INL, CNRS / École Centrale de Lyon / Univ. Claude Bernard / INSA Lyon / CPE Lyon)

Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble (IRIG, CEA / Université Grenoble Alpes)

Single artificial atoms in silicon emitting at telecom wavelengths. *Nature Electronics*, le 23 novembre 2020.



Un scan optique de l'échantillon de silicium-sur-isolant (SOI) implanté carbone. Les points chauds de photoluminescence isolés correspondent à des défauts fluorescents individuels, générant des photons uniques aux longueurs d'onde télécom. © W. Redjem et al

10 µm

DES ONDES DE MATIÈRE SOUS CONTRÔLE OPTIMAL

Des chercheurs et des chercheuses sont parvenus à manipuler précisément et simplement des nuages d'atomes ultrafroids, des condensats de Bose-Einstein, à l'aide d'un réseau optique commandé par un algorithme de contrôle optimal. Les physiciens et physiciennes ont publié ces nouveaux résultats dans *PRX Quantum*.

David Guéry-Odelin, Enseignant-chercheur à l'Université de Toulouse Paul Sabatier

Laboratoire collisions agrégats réactivité (LCAR, CNRS/Univ. Toulouse – Paul Sabatier)

Laboratoire interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB, CNRS/COMUE Univ. Bourgogne Franche-Comté)

Quantum State Control of a Bose-Einstein Condensate in an Optical Lattice. *PRX Quantum*, Publié le 05 octobre 2021.



La maîtrise des chaînes de condensat permet de produire à volonté des lignes de points faites de nuages atomiques, avec lesquelles on peut former des lettres, puis des mots.

© LCAR

EXTRAIRE DE L'ÉNERGIE DE LA MESURE QUANTIQUE

Le postulat de la mesure en physique quantique est sans appel : observer un système le perturbe. Des physiciennes et des physiciens ont analysé théoriquement les conséquences énergétiques de ce mécanisme fondamental et conçu des moteurs d'un nouveau type, nourris par la source d'énergie qu'est la mesure. Cette empreinte énergétique du postulat de la mesure complète le point de vue standard, selon lequel mesurer coûte de l'énergie. Ces résultats sont publiés dans la revue *Physical Review Letters*.

Alexia Auffeves, Chercheuse au CNRS

Institut Néel (NEEL, CNRS)

Two-qubit engine fueled by entanglement and local measurements. *Physical Review Letters*, le 24 mars 2021.

DÉPLACER UN OBJET MACROSCOPIQUE GRÂCE À UN SYSTÈME QUANTIQUE

Des chercheurs sont parvenus à mettre en mouvement un oscillateur mécanique de 18 μm de long en excitant optiquement un atome artificiel unique intégré en son sein. Ce travail ouvre la voie à l'émergence d'interfaces reliant le domaine quantique au monde classique. L'équipe associant l'Institut Néel, le LPENSL, le IRIG-PHELIQS (CEA/Univ. Grenoble Alpes), l'Université de Campinas, et l'Université de Nottingham ont publié leurs travaux dans la revue *Nature Nanotechnology*.

Jean-Philippe Poizat, Chercheur au CNRS

Institut Néel (NEEL, CNRS)

Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon (LPENSL, CNRS/ENS Lyon)

Inducing micromechanical motion by optical excitation of a single quantum dot. *Nature Nanotechnology*,
Publié le 21 décembre 2020.

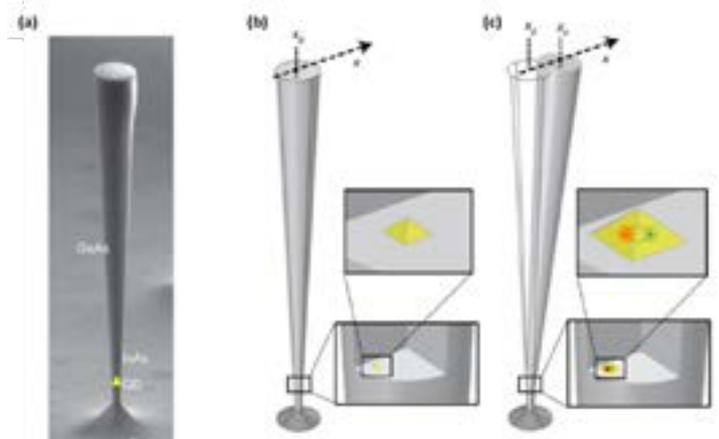
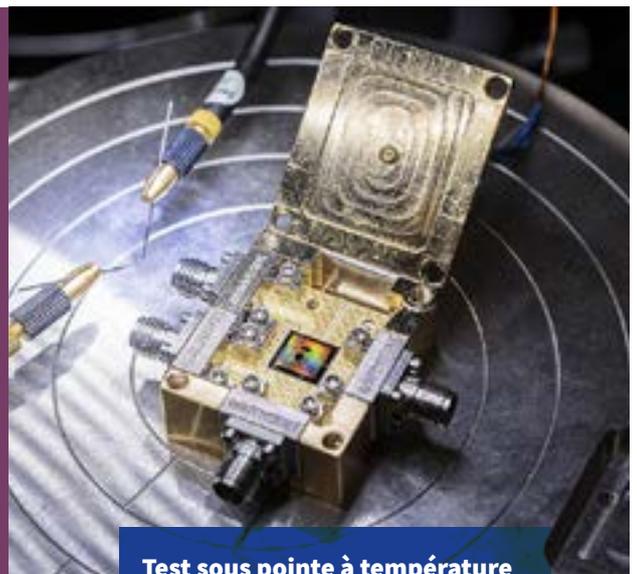


Schéma de principe de l'expérience : un microfil conique semi-conducteur d'arséniure de gallium (GaAs) long de 18 μm , à la base duquel une boîte quantique d'arséniure d'indium est implantée. © Jean-Philippe Poizat

FOCUS LE QUANTIQUE AU CNRS

De la diode, du transistor ou du laser, jusqu'à l'imagerie médicale ou les transferts d'informations sécurisés... la physique quantique est à l'origine d'avancées technologiques inédites qui ont révolutionné notre vie quotidienne. Dans un contexte international de recherche et de développement industriel fortement concurrentiel, le CNRS représente l'atout français majeur pour répondre efficacement aux défis des technologies quantiques de demain et pour positionner la France au plus haut niveau de la compétition internationale.

Découvrez ce dossier dans la rubrique "Documentation" de notre site.



Test sous pointe à température ambiante sur un prototype de puce Cat-Qubits © Hubert RAGUET / Alice&Bob / LPENS / CNRS
Photothèque

PROTÉGER LES BITS QUANTIQUES DE LA DÉCOHÉRENCE GRÂCE AUX PHOTONS

En utilisant deux ondes électromagnétiques de fréquences proches, des chercheurs du CNRS en collaboration avec les universités d'état de Floride (FSU) et de Groningen, ont démontré qu'il est possible de protéger un qubit, équivalent quantique du bit informatique, des sources de décohérence et d'augmenter significativement son temps de vie. Ces résultats sont publiés dans la revue *Scientific Reports*.

Sylvain Bertaina, Chercheur au CNRS

Institut matériaux microélectronique et nanosciences de Provence (IM2NP, CNRS/Aix-Marseille Université)

Laboratoire avancé de spectroscopie pour les interactions, la réactivité et l'environnement (LASIRE, CNRS/Université de Lille)

Experimental protection of quantum coherence by using a phase-tunable image drive. *Scientific Reports*, le 10 décembre 2020.

DES SOURCES DE LUMIÈRE QUANTIQUE POSITIONNÉES DE FAÇON CONTRÔLÉE DANS UN MATÉRIAU 2D

Les sources de lumière joueront un rôle essentiel dans les technologies quantiques émergentes, et parmi elles, les sources de photons uniques dans des matériaux cristallins. Dans ce contexte, en excitant un matériau bidimensionnel avec le faisceau d'un microscope électronique, des chercheurs ont mis au jour de nouvelles sources prometteuses pour la réalisation de dispositifs à grande échelle, dont les propriétés spectrales sont homogènes et dont l'arrangement spatial est contrôlé. Les physiciens et physiciennes du CNRS, en partenariat avec le NIMS (Japon), ont publié ces résultats dans *Nature Communications*.

Aymeric Delteil, Chercheur au CNRS

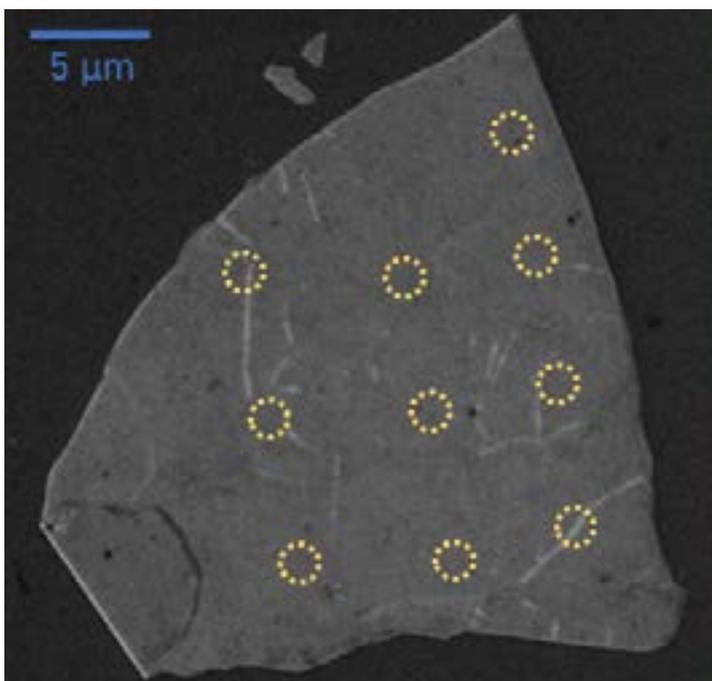
Groupe d'étude de la matière condensée (GEMaC, CNRS / Université Versailles St-Quentin)

Laboratoire de physique de l'ENS (LPENS, CNRS/ENS Paris/Sorbonne Université/ Université de Paris)

Position-controlled quantum emitters with reproducible emission wavelength in hexagonal boron nitride. *Nature Communications*, Publié le 18 juin 2021

À gauche, image réalisée avec un microscope électronique d'un feuillet de nitrure de bore hexagonal de 60 nanomètres d'épaisseur. Les cercles indiquent les positions choisies pour activer des émetteurs quantiques.

À droite, cartographie réalisée avec un microscope confocal de la luminescence du feuillet. Les zones en jaune indiquent une émission de lumière par les centres colorés. Il y a environ 15 émetteurs par impact du faisceau électronique. © A. Delteil, GEMaC



CRÉER DE L'INTRICATION À DISTANCE EN DÉPLAÇANT DES ÉLECTRONS

L'intrication de deux particules est une des clés des technologies quantiques. Dans le cas d'électrons, obtenir une intrication à grande distance est un défi. En exploitant la physique des semiconducteurs, les chercheurs ont réalisé un contrôle sans précédent sur la manipulation des électrons : ils les ont isolés et déplacés à volonté sur plusieurs micromètres tout en préservant leur caractère quantique. Ces résultats sont publiés dans la revue *Nature Nano*.

Tristan Meunier, Chercheur au CNRS

Institut Néel (NEEL, CNRS)

Distant spin entanglement via fast and coherent electron shuttling. *Nature Nano*, publié le 15 février 2021.

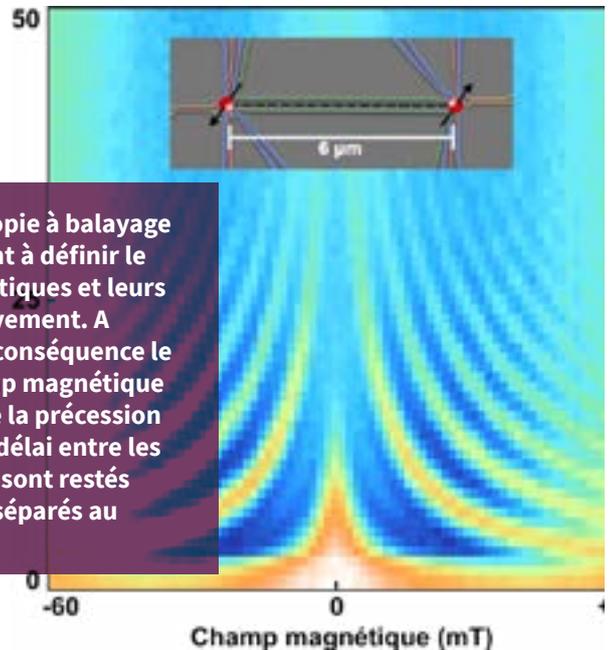


Figure d'interférence issue de l'expérience. Insert : Image de microscopie à balayage de l'échantillon et du transfert de spin électronique. Les grilles servant à définir le canal à électrons sont représentées en vert. Les boîtes quantiques statiques et leurs électromètres sont créés à l'aide des grilles bleues et orange respectivement. A l'aide des grilles rouges, on contrôle l'envoi de chaque électron et en conséquence le temps où les deux électrons sont séparés (délai). Finalement un champ magnétique global est appliqué. La figure d'interférence obtenue est le résultat de la précession quantique des spins induite par le champ magnétique en fonction du délai entre les électrons. Le haut contraste des oscillations montre que les électrons sont restés intriqués au cours de l'expérience, et en particulier lorsqu'ils étaient séparés au maximum de 6µm. © Tristan Meunier, NEEL

TRAITER DES SIGNAUX QUANTIQUES TRANSPORTÉS PAR DES COURANTS ÉLECTRIQUES

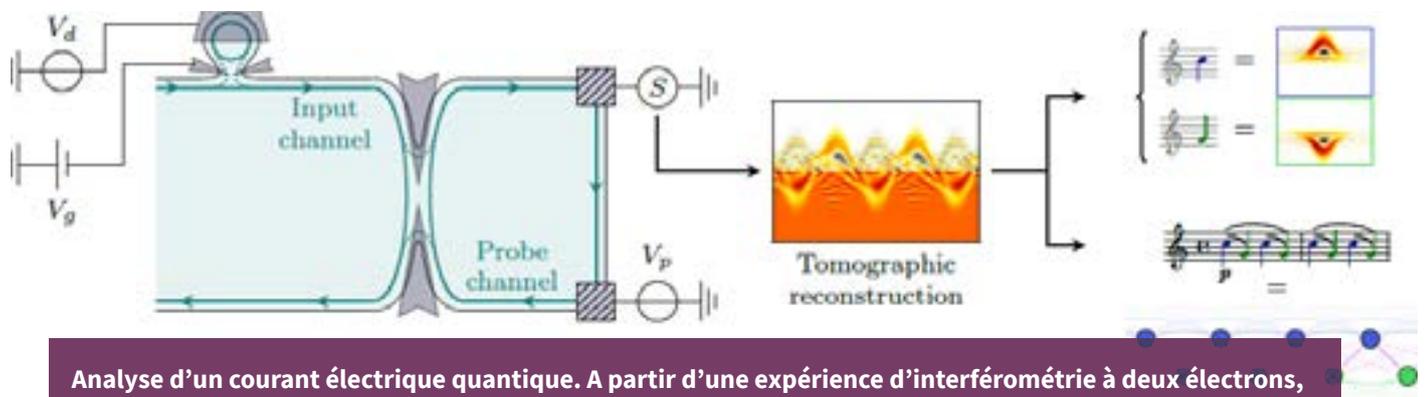
Des scientifiques ont mis au point un algorithme afin d'extraire des informations codées dans les fonctions d'ondes électroniques de courants électriques quantiques. Cela constitue une étape majeure vers le traitement du signal nécessaire au développement des technologies quantiques. Ces résultats sont publiés dans *PRX Quantum*.

Pascal Degiovanni, Directeur de recherche CNRS

Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon (LPENSL, CNRS/ENS Lyon)

Laboratoire de physique de l'ENS (LPENS, CNRS/ENS Paris/Sorbonne Université/ Université de Paris)

Processing Quantum Signals Carried by Electrical Currents. *PRX Quantum*, Publié le 04 mai 2021.



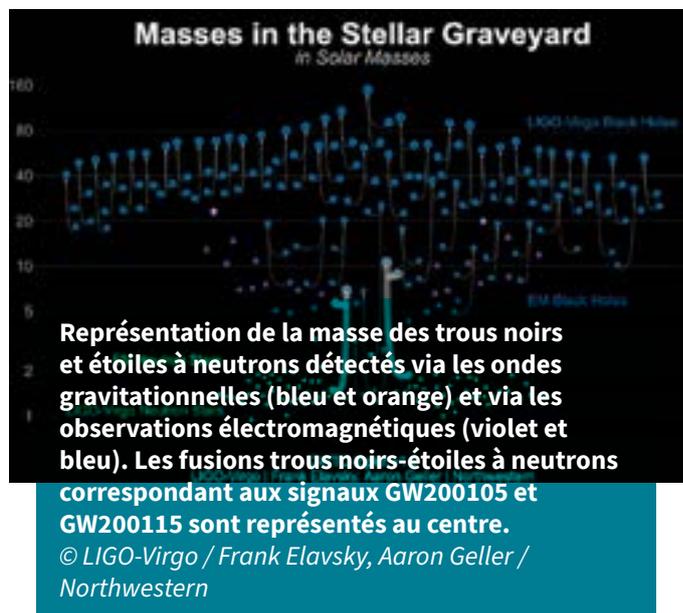
Analyse d'un courant électrique quantique. A partir d'une expérience d'interférométrie à deux électrons, il est possible de reconstituer la cohérence électronique qui contient l'information sur l'ensemble des fonctions d'ondes à une particule véhiculée par le courant électrique en question. L'algorithme présenté dans la publication effectue ainsi, pour les courants électriques quantiques, l'analogue de la transcription d'une symphonie en sa partition : il permet d'extraire une décomposition de ce signal quantique en fonctions d'ondes électroniques élémentaires qui jouent le rôle de « notes de musique » dans une « partition » décrivant les probabilités d'émission de ces fonctions d'onde ainsi que leur cohérence de phase mutuelle. © P. Degiovanni, LPENSL

TERRE ET UNIVERS : DES GALETS AUX TROUS NOIRS

TROUS NOIRS ET ÉTOILES À NEUTRONS : LA DERNIÈRE DANSE DE « COUPLES MIXTES »

Une nouvelle pièce vient d'être ajoutée au catalogue des phénomènes cosmiques. Annoncée par les collaborations Ligo, Virgo et Kagra, il s'agit de la première détection d'ondes gravitationnelles¹ provenant de la fusion « mixte » entre un trou noir et une étoile à neutrons². Cette découverte, publiée le 29 juin 2021 dans Astrophysical Journal Letters, implique des chercheurs et chercheuses du CNRS travaillant au sein de la collaboration scientifique Virgo.

Quelques années ont suffi pour que l'observation des ondes gravitationnelles fournisse un répertoire conséquent de phénomènes issus d'objets cosmiques massifs. Les détecteurs Ligo et Virgo ont ainsi permis d'étudier des fusions de « couples » (ou binaires) de trous noirs, pour la plupart, et parfois d'étoiles à neutrons. Mais des ondes gravitationnelles, mesurées en janvier 2020 et dont les signaux associés sont surnommés GW200105 et GW200115 selon leurs dates de détection, témoignent de l'existence de nouveaux types de systèmes. Ces signaux proviennent en effet d'un phénomène déjà théorisé, mais jusqu'alors jamais observé : la coalescence de « couples mixtes » composés chacun d'un trou noir et d'une étoile à neutrons³. Les ondes gravitationnelles contiennent des informations précieuses sur leurs origines, comme la masse des éléments de la binaire. Leurs analyses ont donc permis de révéler que GW200105 provenait d'un trou noir et d'une étoile à neutrons respectivement 8,9 fois et 1,9 fois plus massifs que le Soleil et dont la fusion a eu lieu il y a 900 millions d'années. Le signal GW200115, quant à lui, est issu d'objets 5,7 et 1,5 fois plus massifs que notre astre et sa coalescence remonte à 1 milliard d'années. La différence de masse entre les éléments du système indique qu'il s'agit bien de binaires « mixtes » : la masse de l'objet le plus lourd correspond effectivement à celle d'un trou noir et la masse du plus léger à celle d'une étoile à neutrons. L'écart entre ces deux masses pourrait aussi expliquer l'absence d'observation de signaux lumineux par des télescopes. En effet, une étoile à neutrons s'approchant d'un trou noir peut théoriquement se déchirer sous l'effet de forces de marée, provoquant alors une éruption de rayonnements



lumineux. Mais dans les deux cas observés, le trou noir, bien plus massif, pourrait avoir avalé l'étoile à neutrons en une seule bouchée, sans laisser de traces.

Plusieurs hypothèses pourraient expliquer la formation de ces binaires « mixtes ». La première est celle de l'évolution d'un couple d'étoiles, en orbite l'une autour de l'autre, qui deviendraient à la fin de leur vie un trou noir et une étoile à neutrons encore liés. Selon une autre hypothèse, celle de l'interaction dynamique, les deux éléments se formeraient séparément dans un milieu stellaire très dense

avant de se rejoindre. Ces résultats ouvrent la voie à la détection d'autres binaires « mixtes » et à l'observation et la compréhension de phénomènes extrêmes similaires

À propos des collaborations Virgo, Ligo et Kagra

La collaboration Virgo est actuellement composée d'environ 690 scientifiques de 15 pays. L'Observatoire gravitationnel européen (EGO) héberge le détecteur Virgo près de Pise en Italie, et est financé par le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) en France, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) en Italie et Nikhef aux Pays-Bas. Une liste des équipes impliquées dans la collaboration Virgo est disponible sur public.virgo-gw.eu/the-virgo-collaboration.

Ligo est financé par la National Science Foundation (NSF) et géré par Caltech et le MIT, qui ont conçu Ligo et dirigé le projet. Le financement du projet Advanced Ligo est assuré par la NSF, avec des contributions importantes de l'Allemagne (Max Planck Gesellschaft), du Royaume-Uni (Science and Technology Facilities Council) et de l'Australie (Australian Research Council - OzGrav). Environ 1300 scientifiques du monde entier sont regroupés au sein de la collaboration scientifique Ligo, qui comprend la collaboration GEO. Les autres partenaires sont recensés sur my.ligo.org/census.php.

L'interféromètre laser Kagra est situé à Kamioka, au Japon. L'institut hôte est l'Institut de recherche sur les rayons cosmiques (ICRR) de l'Université de Tokyo, et le projet est co-animé par l'Observatoire astronomique national du Japon (NAOJ) et l'Organisation de recherche sur les accélérateurs de haute énergie (KEK). Sa construction s'est terminée en 2019 et la prise de données a débuté en février 2020 lors du dernier run, "O3b". La collaboration Kagra comprend plus de 470 membres de 14 pays/régions. La publication scientifique annonçant cette observation est cosignée par 102 scientifiques de 8 équipes françaises faisant partie de la collaboration Virgo:

- le laboratoire Astroparticule et cosmologie (CNRS/Université de Paris) ;
- le laboratoire Astrophysique relativiste, théories,

expériences, métrologie, instrumentation, signaux (CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur/Université Côte d'Azur) ;

- l'équipe g-MAG, qui regroupe des scientifiques de l'Institut lumière matière (CNRS/Université Claude Bernard Lyon 1), de l'Institut des nanotechnologies de Lyon (CNRS/Ecole Centrale de Lyon/INSA Lyon/Université Claude Bernard Lyon 1/CPE Lyon), de l'Institut des nanosciences de Paris (CNRS/Sorbonne Université) et du laboratoire Navier (CNRS/École des Ponts ParisTech/Université Gustave Eiffel) ;
- l'Institut de physique des 2 infinis de Lyon (CNRS/Université Claude Bernard Lyon 1) ;
- l'Institut pluridisciplinaire Hubert Curien (CNRS/Université de Strasbourg) ;
- le Laboratoire d'Ancecy de physique des particules (CNRS/Université Savoie Mont Blanc) ;
- le Laboratoire Kastler Brossel (CNRS/Sorbonne Université/ENS-PSL/Collège de France) ;
- le Laboratoire de physique des 2 infinis - Irène Joliot-Curie (CNRS/Université Paris-Saclay).
- Des scientifiques co-signataires sont associés aux équipes ci-dessus et font partie des laboratoires suivants : l'Institut Foton (CNRS/Insa Rennes/Université de Rennes 1), le laboratoire Lagrange (CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur/Université Côte d'Azur), le Laboratoire de physique et d'étude des matériaux (CNRS/Sorbonne Université/ESPCI Paris).

Astrid Lamberts, Chercheuse au CNRS

Matteo Barsuglia, Chercheur au CNRS,

Institut lumière matière (ILM, CNRS/Université Claude Bernard Lyon 1)

Laboratoire Kastler Brossel (LKB, CNRS/Sorbonne Université/ENS-PSL/Collège de France)

Observation of gravitational waves from two neutron star-black hole coalescences, *Astrophysical Journal Letters*, le 29 juin 2021.

Vue d'artiste d'une fusion trou noir-étoile à neutrons.

© Carl Knox, OzGrav - Swinburne University



MAGIC 2021 : MIEUX CONNAITRE LES SOURCES ET PUIITS DE CARBONE EN RÉGION BORÉALE

Du 14 au 27 août 2021, une campagne de grande envergure dans le nord de la Norvège, de la Suède et de la Finlande aura pour but de vérifier les inventaires de gaz à effet de serre dans cette région clé pour le cycle du carbone. Pilotée par le CNRS et le CNES, la campagne Magic 2021 bénéficie aussi du soutien des agences spatiales allemande (DLR) et européennes (ESA, Eumetsat). Elle mobilise 17 équipes de 7 pays.

Le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄) sont les deux principaux gaz à effet de serre anthropiques, c'est-à-dire émis par les activités humaines. Afin de mieux connaître leur distribution dans l'atmosphère et les émissions associées, l'initiative Magic a été lancée en 2017. Après 3 campagnes de préparation organisées en France métropolitaine ces dernières années, celle de 2021 se tiendra dans le nord de la Norvège, de la Suède et de la Finlande. Un consortium international de plus de 80 scientifiques exploitera une batterie d'instruments déployés au sol, à bord d'une vingtaine de ballons et de trois avions de recherche, véritables laboratoires volants.

Cette région boréale recèle d'importantes sources de CH₄, liées aux activités humaines (extraction et distribution de gaz et de pétrole) ou d'origine naturelle (zones humides, tourbières, lacs, hydrates de méthane³), mais dont les émissions sont mal estimées. En effet, les mesures en continu y sont rares du fait de leur faible densité de population, de l'hiver boréal et des conditions météorologiques. Par ailleurs, les hautes latitudes sont généralement considérées comme un puits pour le CO₂ atmosphérique. Comme les sources naturelles de méthane, ce dernier serait cependant fortement affecté par le réchauffement rapide de ces latitudes.

La campagne Magic 2021, qui profitera de la tenue simultanée de la campagne de ballons stratosphériques Klimat 2021 du CNES à Kiruna (Suède), aura donc pour objectif de mesurer les flux de gaz à effet de serre et en particulier les émissions à la fois naturelles et anthropiques de méthane. Elle permettra aussi de valider les observations faites par les satellites OCO-2 (Nasa), Sentinel-5P (ESA) et par l'instrument IASI du CNES à bord des satellites Metop (ESA-Eumetsat), comme par exemple la détection de points chauds d'émissions de méthane localisés depuis l'espace au-dessus de lacs subpolaires.

Les données recueillies permettront en outre de préparer les futures missions spatiales françaises pour le suivi des gaz à effet de serre, lancées ces prochaines années : Merlin (mission franco-allemande pour la mesure du méthane, 2027), MicroCarb (mission française pour la mesure du dioxyde de carbone, 2023) et IASI-NG (instrument français équipant les satellites européens Metop-SG pour la mesure de la composition atmosphérique et du climat, 2024). Ainsi, le démonstrateur aéroporté de Merlin développé par le DLR volera pour la première fois à bord d'un avion de recherche français en compagnie d'autres instruments de télédétection.

Outre le CNRS et ses partenaires universitaires, le CNES et l'Onera en France, cette campagne implique l'agence spatiale allemande (DLR), le Swedish Space Corporation, l'Institut météorologique finlandais, l'université de Groningen, le King's College London, le British Antarctic Survey, et le Jet Propulsion Laboratory de la Nasa. Le financement est principalement assuré par le CNES, le CNRS et l'ESA, avec une contribution d'Eumetsat.



Lâcher de l'instrument AirCore sous ballon léger dilatable depuis le site d'Aire-sur-l'Adour du CNES en 2020. L'instrument AirCore prélève une carotte d'air, qui sera ensuite analysée. Au premier plan : un spectromètre EM27/SUN.

© Cyril Crevoisier

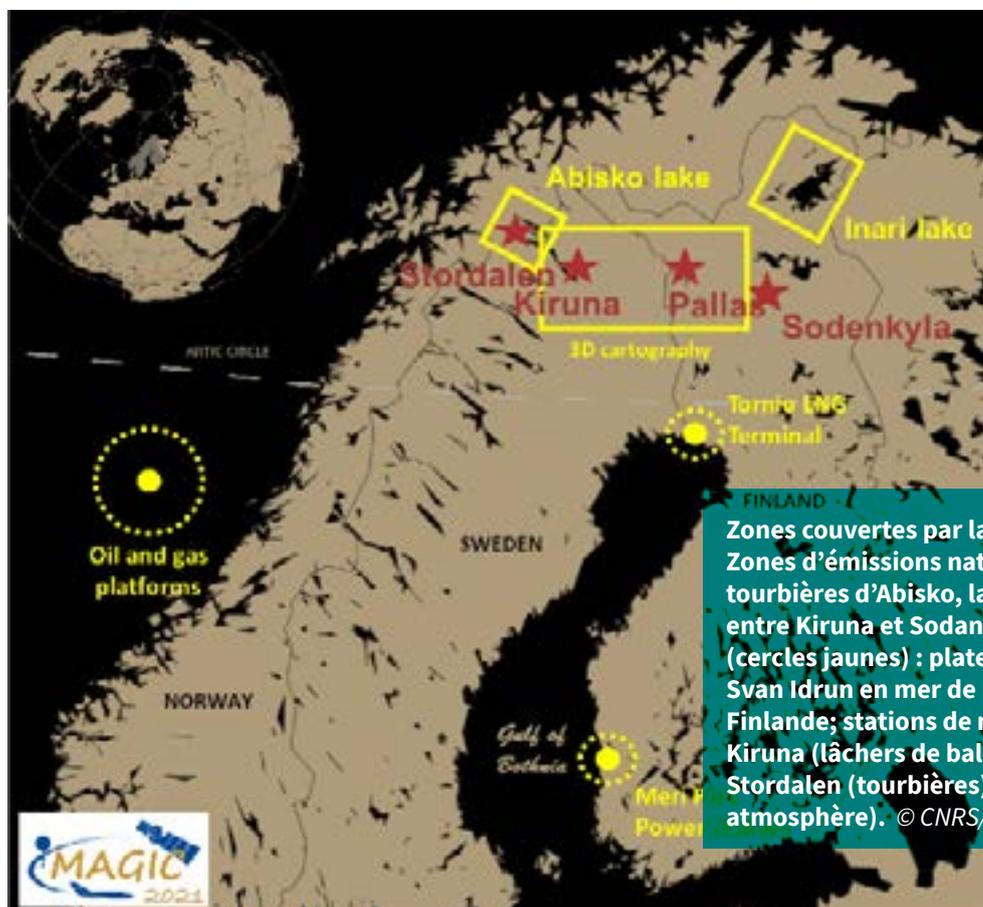
Les structures françaises impliquées dans cette mission sont :

- le Laboratoire de météorologie dynamique (CNRS/ENS-PSL/Ecole polytechnique-Institut polytechnique de Paris/Sorbonne Université),
- le Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique (CNRS/Université de Reims Champagne-Ardenne),
- le Laboratoire d'optique atmosphérique (CNRS/Université de Lille),
- le Laboratoire d'études du rayonnement et de la matière en astrophysique et atmosphères (CNRS/Observatoire de Paris-PSL/Sorbonne Université/ENS-PSL/CY Cergy Paris Université),
- le Laboratoire de physique et de chimie de l'environnement et de l'espace (CNRS/CNES/Université d'Orléans)

- le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CNRS/CEA/UVSQ),
- le Service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement (CNRS/Météo-France/CNES),
- le Département optique et techniques associées de l'Onera,
- les équipes projets Merlin, MicroCarb, IASI-NG ainsi que la division ballons du CNES.

Cyril Crevoisier, Chercheur au CNRS

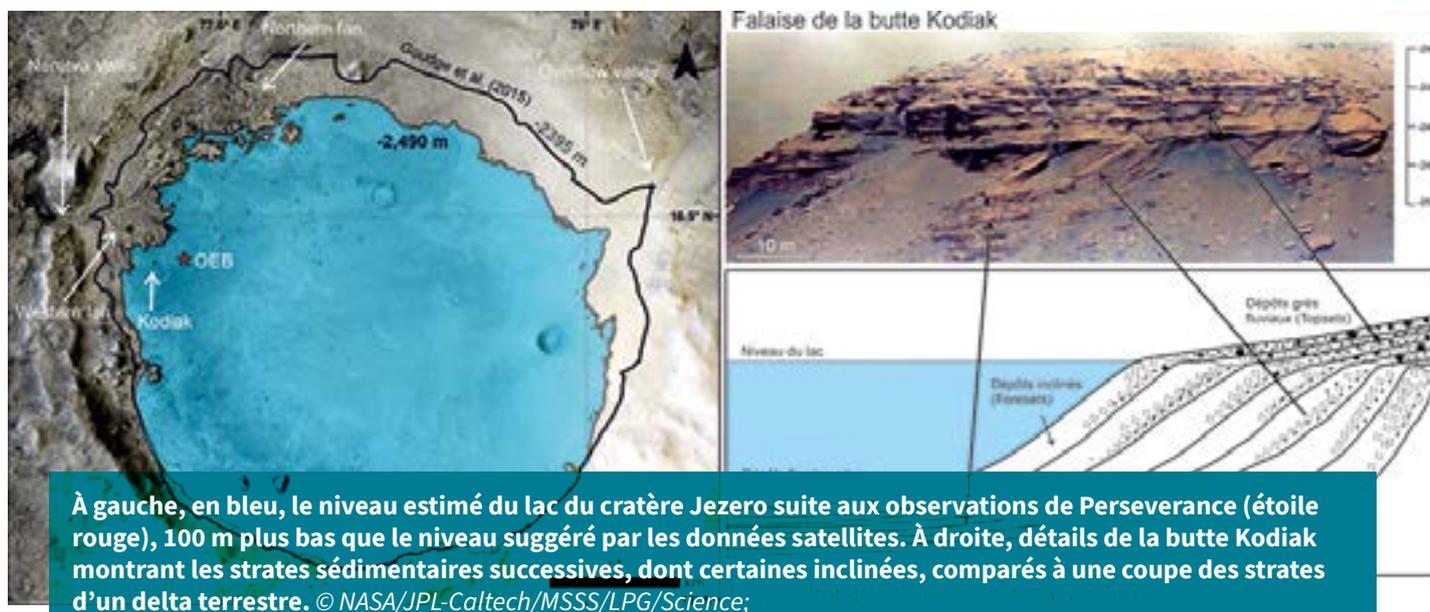
Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique (GSMA, CNRS / Université de Reims Champagne-Ardenne)



Zones couvertes par la campagne MAGIC2021.
 Zones d'émissions naturelles (carrés jaunes) : lac et tourbières d'Abisko, lac d'Inari, région circumpolaire entre Kiruna et Sodankylä ; zones d'émission anthropique (cercles jaunes) : plateformes de Heidrun, Norne et Svan Idrun en mer de Norvège, centrale de Meri Pori en Finlande; stations de mesures (étoiles rouges) : Esrange-Kiruna (lâchers de ballons stratosphériques), Abisko-Stordalen (tourbières) et Pallas-Sodankylä (écosystèmes et atmosphère). © CNRS/LMD

MARS : LE ROVER PERSEVERANCE LIVRE SES PREMIERS RÉSULTATS

Le rover Perseverance vient de confirmer l'intérêt de son site d'atterrissage : le cratère Jezero a bien abrité un lac, alimenté par une rivière via un delta, il y a 3,6 milliards d'années. Dirigée par un chercheur du CNRS, l'équipe internationale a notamment impliqué en France des scientifiques de l'Université Claude Bernard Lyon 1 et de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier et publie ses conclusions le 7 octobre dans *Science*. Ces observations ont été obtenues grâce à l'instrument Supercam du rover de la NASA, construit en France sous l'autorité du CNES.



À gauche, en bleu, le niveau estimé du lac du cratère Jezero suite aux observations de Perseverance (étoile rouge), 100 m plus bas que le niveau suggéré par les données satellites. À droite, détails de la butte Kodiak montrant les strates sédimentaires successives, dont certaines inclinées, comparés à une coupe des strates d'un delta terrestre. © NASA/JPL-Caltech/MSSS/LPG/Science;

Arrivé en février dernier à la surface de Mars, Perseverance a rapidement débuté ses investigations afin de mieux comprendre l'histoire passée de la planète rouge. Dans cette toute première étude issue des données de ce rover, dirigée par un géologue CNRS du Laboratoire de planétologie et géodynamique (CNRS/Université de Nantes/Université d'Angers), le rover de la Nasa a permis de confirmer l'intérêt de son site d'atterrissage et apporte de nouveaux éclairages sur son évolution hydrologique.

Le cratère Jezero avait été choisi car les images satellites donnaient des indices géologiques évoquant notamment un ancien lac au débouché d'une vallée fluviale. Perseverance a justement observé dans cette zone un ensemble de strates sédimentaires inclinées, prises en sandwich entre des strates horizontales : une géométrie typique de celle des deltas sur Terre et qui permet de déterminer le niveau du lac lors de ces dépôts. Ces résultats confirment et précisent le passé lacustre du cratère Jezero : il y a 3,6 milliards d'années, l'étendue d'eau faisait plusieurs dizaines de mètres de profondeur et s'étendait sur tout le fond du cratère Jezero, une surface d'environ 35 km de diamètre.

L'équipe de recherche a également noté au-dessus des dépôts lacustres des strates drastiquement différentes caractérisées par la présence de gros galets et de blocs rocheux de plus d'un mètre de côté. Ces dépôts témoignent de forts courants fluviaux, comme lors de crues soudaines. La fin de la période lacustre du cratère a donc été le théâtre

d'un changement radical d'hydrologie, probablement signe d'un changement climatique majeur.

Le rover a réalisé ses observations à distance, en se tenant à plus de 2 km des formations géologiques étudiées, grâce à l'instrument américain Mastcam-Z et surtout à l'instrument franco-américain Supercam dont la caméra permet d'observer des détails de moins de 10 cm à cette distance.

Ces résultats orientent le programme d'analyses futures du rover à l'intérieur du cratère Jezero car les deux types de roches identifiées sont des objectifs majeurs de la mission : les strates sédimentaires sont de très bonnes candidates pour retrouver des traces de vie passée et les blocs rocheux de grande taille pourraient fournir des fragments de croûte martienne. Des échantillons pourraient être prélevés en préparation d'un retour sur Terre à l'horizon 2030.

Nicolas Mangold, Chercheur au CNRS
Sylvestre Maurice, Astronome à l'Université Toulouse III – Paul Sabatier

Laboratoire de planétologie et géosciences (LPG), CNRS / Université de Nantes / Université d'Angers

Perseverance rover reveals ancient delta-lake system and flood deposits at Jezero crater, Mars. *Science*, le 7 octobre 2021.

PLUS DE 5 000 TONNES DE POUSSIÈRES EXTRATERRESTRES TOMBENT CHAQUE ANNÉE SUR TERRE

Chaque année, notre planète rencontre des poussières de comètes et d'astéroïdes. Ces poussières interplanétaires traversant notre atmosphère donnent naissance aux étoiles filantes. Une partie d'entre elles atteignent le sol sous forme de micrométéorites. Un programme international mené depuis près de 20 ans par des scientifiques du CNRS, de l'Université Paris-Saclay et du Museum national d'Histoire naturelle avec le soutien de l'Institut polaire français, a pu déterminer que 5200 tonnes par an de ces micrométéorites atteignent le sol terrestre. L'étude sera disponible dans la revue *Earth & Planetary Science Letters* à partir du 15 avril.

Des micrométéorites tombent depuis toujours sur notre planète. Ces poussières interplanétaires provenant de comètes ou d'astéroïdes sont des particules de quelques dixièmes à centièmes de millimètres qui ont traversé l'atmosphère et atteint la surface de la Terre.

Pour collecter et analyser ces micrométéorites, six expéditions menées sous la responsabilité de Jean Duprat, chercheur du CNRS, ont eu lieu au cours des deux dernières décennies, à proximité de la station franco-italienne Concordia (Dôme C) à 1100 kilomètres des côtes de Terre Adélie, au cœur de l'Antarctique. Dôme C est un lieu idéal de collecte en raison de la faible accumulation de neige et de la quasi-absence de poussières terrestres.

Ces différentes expéditions ont permis de collecter suffisamment de particules extraterrestres, de tailles comprises entre 30 et 200 micromètres, pour mesurer leur flux annuel, qui correspond à la masse accrétée, par la Terre, par m² et par année.

En ramenant ces résultats à l'ensemble de notre planète, le flux total annuel de micrométéorites représente 5200 tonnes par an. Il s'agit là du principal apport de matière extraterrestre sur notre planète, loin devant celui des objets de plus grandes tailles comme les météorites, dont le flux est inférieur à une dizaine de tonnes par an.

La comparaison du flux de micrométéorites avec les prévisions théoriques confirme que l'essentiel d'entre elles provient très probablement de comètes (80%) et le reste d'astéroïdes.



Collecte de micrométéorites dans les régions centrales antarctiques, à Dôme C en 2002. Prélèvement de neige. © Jean DUPRAT/ Cécile ENGRAND/ CNRS Photothèque

Autant d'informations précieuses pour mieux comprendre le rôle joué par ces poussières interplanétaires dans l'apport en eau et en molécules carbonées sur la jeune Terre.



Micrographie électronique d'une micrométéorite Concordia extraite des neiges antarctiques à Dôme C. © Cécile ENGRAND/Jean DUPRAT

Jean Duprat, Chercheur au CNRS
Cécile Engrand, Chercheuse au CNRS

Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie (IMPMC, CNRS / MNHN / Sorbonne Université)

Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay (ISMO, CNRS / Université Paris-Saclay)

The micrometeorite flux at Dome C (Antarctica), monitoring the accretion of extraterrestrial dust on Earth. *Earth & Planetary Science Letters*, le 15 avril 2021

COMMENT ÉTUDIER L'AMMONIAC À TRÈS HAUTE TEMPÉRATURE ET TRÈS HAUTE PRESSION POUR MIEUX COMPRENDRE LES PLANÈTES GÉANTES GLACÉES

L'ammoniac NH_3 est considéré l'un des composants principaux des manteaux d'Uranus et Neptune. Aux conditions thermodynamiques de leur intérieurs, les propriétés de l'ammoniac sont très mal connues, en raison des difficultés considérables à le manipuler et comprimer. Des chercheurs et des chercheuses ont développé un dispositif adapté aux expériences de compression par choc laser pour étudier le comportement de l'ammoniac à des pressions et des températures extrêmes. Cette étude apporte de nouvelles données pour mieux comprendre certaines énigmes de géantes glacées, tels que le caractère inédit de leur champ magnétique.

Deux tiers de la masse de Uranus et Neptune sont supposés être constitués de ce qu'on appelle, en dépit de son état solide ou liquide, la "glace planétaire" : un mélange d'eau, ammoniac et méthane. À des pressions de millions d'atmosphères (Mbar) et des températures de plusieurs milliers de K typiques de leurs intérieurs, les propriétés de l'ammoniac (NH_3) sont très mal connues, différemment de l'eau, beaucoup plus étudiée. Des calculs ab initio, très complexes et couteux, prédisent pour NH_3 des propriétés très particulières : des phases "superioniques", avec un comportement entre le solide et le liquide, ou la formation de fluides de différentes espèces chimiques. Confirmer expérimentalement ces prédictions est crucial car cela contribuerait à élucider certaines des énigmes relevées par les observations astronomiques de ces deux planètes : les scientifiques cherchent par exemple à comprendre l'origine de leur champ magnétique, fortement non-bipolaire et différent de celui des autres planètes du système solaire. En effet, la topologie étrange de ce champ magnétique est liée à des propriétés microscopiques de la matière comprimée formant l'intérieur de ces planètes, en particulier sa conductivité électrique. Cependant, jusqu'à présent, les pressions et les températures atteintes en laboratoire pour l'ammoniac n'étaient pas suffisamment élevées pour étudier de façon pertinente les intérieurs d'Uranus et Neptune. Les expériences de compression par choc laser constituent un outil très efficace pour générer des conditions thermodynamiques extrêmes, mais adapter ce schéma expérimental à l'ammoniac nécessite le développement d'une cible adaptée.

L'ammoniac est, en effet, un matériau particulièrement difficile à manipuler et à comprimer. À température ambiante, il se présente sous forme gazeuse, ce qui a un double désavantage pour la compression par choc laser : d'un côté, cela limite la pression atteignable et, de l'autre, cela amène à des températures trop élevées. Pour surmonter ces difficultés, la démarche consiste à considérer un état initial plus dense, liquide, voire solide. Pour faire cela, il est nécessaire que la cible de NH_3 soit préparée, et éventuellement maintenue, dans un état pré-comprimé et/ou à basse température avant l'expérience. Coupler ces exigences avec les contraintes imposées par les expériences laser est un véritable défi en raison des dimensions, de la compatibilité au vide ainsi que des difficultés à inclure des diagnostics adéquats. Des difficultés supplémentaires surviennent avec l'ammoniac en raison de ses propriétés chimiques, comme la corrosion et la miscibilité,

qui compliquent énormément la conception et réalisation des cibles.



Représentation d'artiste de l'expérience : avec les lasers de puissance on peut explorer les propriétés de la matière à l'intérieur des planètes tels que les planètes géantes glacées, composés d'un mélange complexe d'eau, d'ammoniac et de méthane

©Alessandra Rivasio, LULI

Des équipes du Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI, CNRS / École Polytechnique / CEA / Sorbonne Université),* ont réussi ce défi, et elles ont développé un nouveau schéma de cible d'ammoniac liquide adaptée à la fois aux propriétés physiques de l'ammoniac et aux expériences de compression par choc laser. En focalisant le laser LULI2000 sur ces cibles, les chercheurs et les chercheuses ont réussi à générer une onde de choc comprimant l'ammoniac à des pressions et températures de plusieurs Mbar et allant jusqu'à 40000 K. En couplant ces données pionnières avec des nouvelles simulations numériques, ils ont mis en évidence que la conductivité électrique de l'ammoniac est un ordre de grandeur plus élevée de celle de l'eau dans des conditions similaires. Ce résultat est novateur car les données expérimentales existantes semblaient suggérer le contraire. Ces travaux soulignent ainsi la nécessité de considérer la contribution de l'ammoniac à la génération du champ magnétique d'Ura-

nus et de Neptune et fournissent aux modèles les données nécessaires pour améliorer notre compréhension de ce processus et progresser dans la connaissance de ces deux géantes glacées. Ces travaux sont publiés dans la revue *Physical Review Letters*.

*en collaboration avec des chercheurs et des chercheuses du Laboratoire de géologie de Lyon (LGL-TPE, CNRS / Univ. Claude Bernard / ENS Lyon), de l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (IMPMC, CNRS / MNHN / Sorbonne Univ.), et des Universités de Rostok et Oslo.

Alessandra Ravasio, Chercheuse au CNRS

Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI, CNRS / École Polytechnique / CEA / Sorbonne Université)

Metallization of Shock-Compressed Liquid Ammonia.
Physical Review Letters. Publié le 13 janvier 2021.



Photographie de la cible d'ammoniac sur le banc de pré-alignement avant d'être placée dans la chambre expérimentale pour le tir laser.

©Alessandra Ravasio, LULI

DES GALETS POSÉS NATURELLEMENT SUR UN PIÉDESTAL DE GLACE : UN PHÉNOMÈNE ENFIN COMPRIS

Telles des oeuvres d'art trônant dans un musée, certains galets se retrouvent, dans la nature, sur un piédestal de glace sans intervention humaine. Ce phénomène de « Zen stones », nommé en référence aux galets en équilibre dans les jardins japonais, apparaissent à la surface des lacs gelés notamment celle du lac Baïkal (Russie). Ces structures sont le résultat d'un phénomène de sublimation, qui fait passer un corps, ici la glace, de solide à gazeux sans l'intermédiaire liquide.



Reproduction du phénomène de Zen stones au laboratoire dans un lyophilisateur

© Nicolas Taberlet / Nicolas Plihon

C'est ce que viennent de démontrer des chercheurs CNRS et de l'Université Claude Bernard Lyon 1 en reproduisant ce phénomène en laboratoire. Ils ont ainsi pu démontrer, que l'ombre du galet limite le rayonnement solaire nécessaire à la sublimation de la glace, permettant ainsi de sculpter le piédestal. Ces travaux ont donc permis de mettre en évidence et de comprendre l'un des rares phénomènes de sublimation dans un contexte naturel sur Terre. Ils sont publiés dans la revue *PNAS* la semaine du 27 septembre 2021.

Nicolas Plihon, Chercheur au CNRS

Nicolas Taberlet, Enseignant-chercheur Université Claude Bernard Lyon 1

Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon (LPENSL, CNRS / ENS de Lyon)

Sublimation-driven morphogenesis of Zen stones on ice surfaces. *PNAS*, semaine du 27 septembre 2021

COMPRENDRE LA GÉNÉRATION DES RAYONS COSMIQUES EN LABORATOIRE

En combinant lasers de puissance et champs magnétiques intenses, des chercheurs sont parvenus, pour la première fois, à recréer en laboratoire les conditions d'émission de particules accélérées lors du choc entre le milieu interplanétaire et le champ magnétique terrestre. Ces travaux sont publiés dans la revue *Nature Physics* par une collaboration internationale impliquant notamment le LNCMI et le LULI.

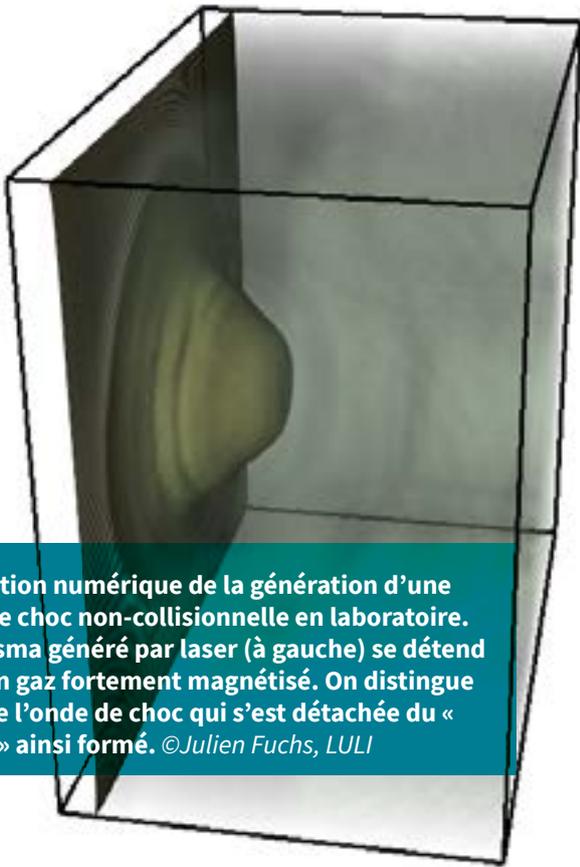
Julien Fuchs, Chercheur au CNRS

Laboratoire national des champs magnétiques intenses (LNCMI, CNRS)

Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI, CNRS / École Polytechnique / CEA / Sorbonne Université)

Laboratory evidence for proton energization by collisionless shock surfing. *Nature Physics*, Publié le 19 août 2021.

Simulation numérique de la génération d'une onde de choc non-collisionnelle en laboratoire. Un plasma généré par laser (à gauche) se détend dans un gaz fortement magnétisé. On distingue à droite l'onde de choc qui s'est détachée du « piston » ainsi formé. ©Julien Fuchs, LULI



DANS L'UNIVERS, LES GLACES SE FORMENT MOINS FACILEMENT QU'ON LE CROIT

En reproduisant en laboratoire certaines des conditions du milieu interstellaire, les chercheuses et les chercheurs montrent que la taille des grains de poussière interstellaire joue un rôle important dans la probabilité d'adsorption des gaz sur ces grains. Cette donnée est essentielle pour la modélisation de la croissance des glaces cosmiques et la compréhension des observations astrophysiques. Ces travaux sont publiés dans la revue *Nature Astronomy*

Philippe Parent, Chercheur au CNRS

Les grains de poussières cosmiques se recouvrent peu à peu d'une couche de glace dont la croissance dépend du coefficient de collage de H₂O sur le grain. Au premier plan: un grain glacé de taille submicrométrique (vue d'artiste); à l'arrière-plan, une photographie de la Voie Lactée prise de la Terre, où l'on distingue clairement les nuages de poussières concentrés dans le plan galactique. ©Philippe Parent, CINaM

Centre interdisciplinaire de nanoscience de Marseille (CINaM, CNRS/Aix-Marseille Université)

Laboratory-based sticking coefficients for ices on a variety of small-grain analogues. *Nature Astronomy*, Publié le 25 janvier 2021.



DES ROCHES « MARTIENNES » SYNTHÉTISÉES EN LABORATOIRE POUR INTERPRÉTER LES DONNÉES DE LA MISSION INSIGHT

Depuis 2019, la mission Insight collecte des données sismiques provenant du manteau de la planète Mars. Pour les interpréter, il faut connaître les propriétés des roches qui le composent. En reproduisant en laboratoire les conditions de température et de pression de la planète, des chercheurs et des chercheuses ont étudié la composition possible de ces roches et, grâce à des mesures de vitesses des ondes sismiques, ils ont caractérisé un comportement de ces ondes en fonction de la pression et de la température qui diffère du cas du manteau terrestre, mais qui est en accord avec les observations sur Mars. Des chercheurs et des chercheuses de l'IMPMC et de l'IPGP, en collaboration avec des collègues japonais, ont publié ces résultats dans la revue *Geophysical Research Letters*.

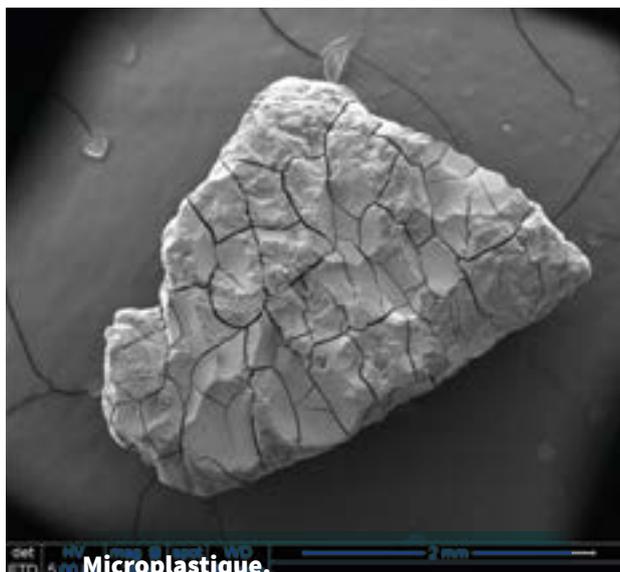
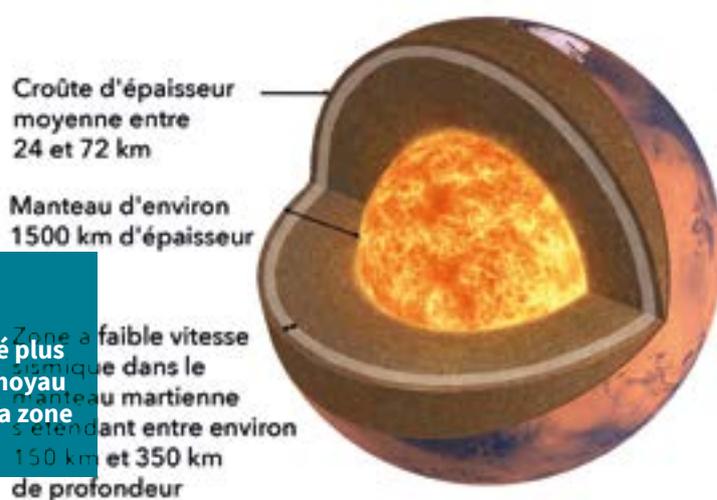
Coupe schématique de l'intérieur de Mars mettant en évidence les couches principales (de l'extérieur vers l'intérieur : une croûte basaltique, un manteau silicaté plus riche en oxydes du fer que le manteau terrestre, et le noyau métallique) ainsi que la profondeur et l'extension de la zone à faible vitesse sismique. ©IPGP/David Ducros

Daniele Antonangeli, Chercheur au CNRS

Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie (IMPMC, CNRS / MNHN / Sorbonne Université)

Institut de physique du globe de Paris (IPGP, CNRS/ IPGP/Univ. Paris)

Low Velocity Zones in the Martian Upper Mantle Highlighted by Sound Velocity Measurements.
Geophysical Research Letters, Publié le 21 septembre 2021.



Microplastique.

La physique de la fragmentation des plastiques dans l'océan : comprendre pour mieux lutter

© Alexandra Ter Halle/ IMRCP

FOCUS UN OCÉAN DE DÉCOUVERTES

Alors que l'Unesco a lancé la Décennie pour les sciences océaniques au service du développement durable (2021-2030), découvrez sur ce blog un aperçu de la diversité des recherches menées au CNRS sur l'océan.

Au-delà de la physique, ce blog collaboratif rassemble des contributions issues des 10 instituts thématiques du CNRS.

Découvrez le blog sur le site de CNRS Le Journal.

ACTUALITÉS INNOVATION

À retrouver sur la page "Actualité" de notre site www.inp.cnrs.fr

Préparation de bobines utilisées pour le magnétoformage de pièces industrielles
© Julien Billette



INNOVATION BREVETS ET LICENCES

MODLOC LOCALISE DES MOLÉCULES EN 3D AVEC UNE PRÉCISION NANOMÉTRIQUE

Des équipes de l'Institut des sciences moléculaires d'Orsay (ISMO, CNRS/Université Paris Saclay) et de l'Institut Langevin (CNRS/Sorbonne Université) ont mis au point une technique de microscopie en fluorescence qui atteint une précision nanométrique dans les trois dimensions. Cette technique appelée ModLoc (Modulated localization) peut s'implémenter sur tout microscope optique. Elle a fait l'objet d'un dépôt de brevet.

INNOVATION BREVETS ET LICENCES

DES BOBINES DE MAGNÉTOFORMAGE À GRANDE DURÉE DE VIE

Le Laboratoire national des champs magnétiques intenses (LNCMI, CNRS) développe des matériaux conducteurs pour électroaimants capables de générer des dizaines de milliers d'impulsions intenses. Conçues en collaboration avec la société Bmax, ces bobines seront utilisées pour le magnétoformage de pièces industrielles. Le LNCMI coordonne par ailleurs le projet ANR SIGMA, auquel participe Bmax/I-Cube Research, et dont l'objectif est de mettre au point des conducteurs composites cuivre/argent combinant forte conductivité électrique et haute résistance mécanique.



INNOVATION BREVETS ET LICENCES

UNE FORMULATION DE VITAMINE C QUI FAVORISE LA RÉGÉNÉRATION DE LA PEAU

Des chercheurs de l'Institut des sciences moléculaires d'Orsay (ISMO, CNRS/Université Paris Saclay) et de l'Institut Galien Paris-Saclay (IGPS, CNRS/Université Paris Saclay) ont synthétisé un dérivé de la vitamine C qui est capable de franchir la barrière cutanée. Les premiers essais ont montré une action très positive sur l'épaisseur de l'épiderme, sur la production de collagène, et sur plusieurs facteurs contrôlant la qualité de la peau.

INNOVATION BREVETS ET LICENSES

PRODUIRE DU MÉTHANE GRÂCE À L'HYPERTHERMIE MAGNÉTIQUE

Le procédé Méthamag, mis au point au Laboratoire de physique et chimie des nano-objets (LPCNO, CNRS/Insa Toulouse/Université Toulouse III- Paul Sabatier), utilise des nanoparticules magnétiques pour activer la réaction catalytique de conversion du CO₂ en méthane. Un projet de maturation est en cours en partenariat avec la société Teréga.

INNOVATION LABORATOIRE COMMUN

DÉTECTER ET QUANTIFIER LES GAZ À EFFET DE SERRE ÉMIS SUR LES SITES INDUSTRIELS

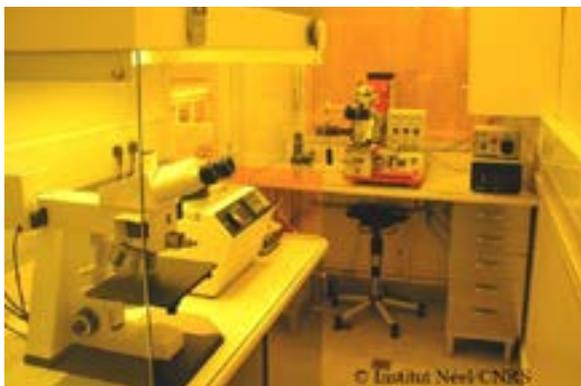
Le laboratoire commun Lynna (Laboratoire d'analyses innovantes pour les émissions atmosphériques) regroupe des chercheurs du Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique (GSMA, CNRS/Université de Reims Champagne-Ardenne) et de TotalEnergies, afin de développer de nouveaux moyens de mesure des émissions de gaz à effet de serre, en particulier avec des capteurs embarqués sous un drone.



INNOVATION BREVETS ET LICENSES

UN NANOCALORIMÈTRE POUR MESURER LA STABILITÉ DES PROTÉINES

Basé sur un procédé de microfabrication développé à l'Institut Néel du CNRS, un calorimètre ultrasensible permet d'évaluer la stabilité des protéines, en effectuant les mesures sur des volumes de quelques microlitres. Une licence exclusive de cette technologie brevetée a été signée avec la start-up Calneos.



INNOVATION START-UP

UN PROPULSEUR IONIQUE POUR LES PETITS SATELLITES

La start-up Ion-X prépare la commercialisation d'une nouvelle technologie de propulsion, compacte et performante, développée au sein du Centre de nanosciences et de nanotechnologies (C2N, CNRS/Université Paris-Saclay) par Jacques Gierak et son équipe, en collaboration avec le Cnes. Basés sur l'électrohydrodynamique, ces propulseurs permettront le déplacement des micro et nanosatellites en orbite.

LISTE DES LABOS

Centre de nanosciences et de nanotechnologies (C2N)

CNRS / Université Paris-Saclay

Centre lasers intenses et applications (CELIA)

CNRS / CEA / Université de Bordeaux

Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales (CEMES)

CNRS

Centre de recherche sur les ions, les matériaux et la photonique (CIMAP)

CNRS / CEA / ENSICAEN / Université de Caen Normandie

Centre interdisciplinaire de nanoscience de Marseille (CINaM)

CNRS / Aix Marseille Université

Centre national de compétences en Nanosciences (C'Nano)

CNRS

Centre de physique théorique (CPHT)

CNRS / École Polytechnique - IPP

Centre de physique théorique (CPT)

CNRS / Aix Marseille Université / Université de Toulon

Centre de recherche sur l'hétéroépitaxie et ses applications (CRHEA)

CNRS

Cristallographie, résonance magnétique et modélisations (CRM2)

CNRS

Dynamical control of materials (DYNACOM)

CNRS / Université Rennes 1 / University of Tokyo

Groupe d'études de la matière condensée (GEMaC)

CNRS / Université de Versailles
Saint-Quentin-en-Yvelines

Groupe de physique des matériaux (GPM)

CNRS / INSA Rouen / Université de Rouen Normandie

Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique (GSMA)

CNRS / Université de Reims Champagne Ardennes

Laboratoire interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB)

CNRS / COMUE Université Bourgogne Franche Comté

Interfaces confinement matériaux et nanostructures (ICMN)

CNRS / Université d'Orléans

Institut d'études scientifiques de Cargèse (IESC)

CNRS / Université Côte d'Azur / Université de Corse
Pasquale Paoli

Institut lumière matière (ILM)

CNRS / Université Claude Bernard

Institut des matériaux, de microélectronique et des nanosciences de Provence (IM2NP)

CNRS / Aix Marseille Université

Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (IMPMC)

CNRS / Muséum national d'histoire naturelle / Sorbonne Université

Institut de physique de Nice (INPHYNI)

CNRS / Université Côte d'Azur

Institut des nanosciences de Paris (INSP)

CNRS / Sorbonne Université

Institut Pascal (IPa)

CNRS / CEA / Institut des hautes études scientifiques
Bures-sur-Yvette / INRIA / Université Paris-Saclay

Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg (IPCMS)

CNRS / Université de Strasbourg

Institut de physique théorique (IPhT)

CNRS / CEA

Institut de physique de Rennes (IPR)

CNRS / Université de Rennes 1

Ingénierie, Radioprotection, Sûreté et Démantèlement (IRSD)

CNRS

Interdisciplinary scientific center Poncelet (ISCP)

CNRS / A.A. Kharkevich institute for information transmission problems / Independent university of Moscow / National research university higher school of economics / Skolkovo institute of science and technology / Steklov mathematical institute of russian academy of sciences

Institut des sciences moléculaires d'Orsay (ISMO)

CNRS / Université Paris-Saclay

Jeunes équipes de l'Institut de Physique du Collège de France (JEIP)

CNRS / Collège de France

Japanese - french laboratory for semiconductor physics and technology (JFAST)

CNRS / Université de Tsukuba / Université Grenoble Alpes

Laboratoire Charles Coulomb (L2C)

CNRS / Université de Montpellier

Laboratoire Aimé Cotton (LAC)

CNRS / Université Paris-Saclay

Adhésion et inflammation (LAI)

CNRS / Aix Marseille Université / INSERM

Laboratoire d'Annecy-le-vieux de physique théorique (LAPTH)

CNRS / Université Savoie Mont Blanc

Laboratoire collisions, agrégats, réactivité (LCAR)

CNRS / Université Toulouse - Paul Sabatier

Laboratoire Charles Fabry (LCF)

CNRS / Institut d'optique graduate school

Laboratoire d'étude des microstructures (LEM)

CNRS / ONERA

École de physique des Houches (LES HOUCHES)

CNRS / CEA / ENS de Lyon / Université Grenoble Alpes

Laboratoire frontières quantiques(LFQ)

CNRS / Université de Sherbrooke

Laboratoire interactions, dynamiques et lasers (LIDYL)

CNRS / CEA

Laboratoire interdisciplinaire de physique (LiPhy)

CNRS / Université Grenoble Alpes

Laboratoire Jean Perrin (LJP)

CNRS / Sorbonne Université

Laboratoire Kastler Brossel (LKB)

CNRS / Collège de France / ENS / Sorbonne Université

Laboratoire Léon Brillouin (LLB)

CNRS / CEA

Laboratoire national des champs magnétiques intenses (LNCMI)

CNRS / INSA Toulouse / Université Grenoble Alpes / Université Toulouse - Paul Sabatier

Laboratoire d'optique appliquée (LOA)

CNRS / ENSTA / École Polytechnique - IPP

Laboratoire d'optique et biosciences (LOB)

CNRS / École Polytechnique / INSERM

Laboratoire ondes et matière d'Aquitaine (LOMA)

CNRS / Université de Bordeaux

Laboratoire photonique, numérique, nanosciences (LP2N)

CNRS / Institut d'optique graduate school / Université de Bordeaux

Laboratoire de physique et chimie des nano-objets (LPCNO)

CNRS / INSA Toulouse / Université Toulouse - Paul Sabatier

Laboratoire de physique et d'étude des matériaux (LPEM)

CNRS / ESPCI Paris / Sorbonne Université

Laboratoire de physique de l'ENS (LPENS)

CNRS / ENS / Sorbonne Université / Université Paris Cité

Laboratoire de physique (LPENSL)

CNRS / ENS de Lyon

Laboratoire de physique des lasers (LPL)

CNRS / Université Sorbonne Paris Nord

Laboratoire de physique et modélisation des milieux condensés (LPMMC)

CNRS / Université Grenoble Alpes

Laboratoire de physique de la matière condensée (LPMC)

CNRS / École Polytechnique - IPP

Laboratoire de physique des solides (LPS)

CNRS / Université Paris-Saclay

Laboratoire de physique théorique (LPT)

CNRS / Université Université Toulouse - Paul Sabatier

Laboratoire de physique théorique et hautes énergies (LPTHE)

CNRS / Sorbonne Université

Laboratoire de physique théorique et modélisation (LPTM)

CNRS / CY Cergy Paris Université

Laboratoire de physique théorique de la matière condensée (LPTMC)

CNRS / Sorbonne Université

Laboratoire de physique théorique et modèles statistiques (LPTMS)

CNRS / Université Paris-Saclay

Laboratoire des solides irradiés (LSI)

CNRS / CEA / École Polytechnique - IPP

Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI)

CNRS / École Polytechnique - IPP / Sorbonne Université

Laboratoire matériaux et phénomènes quantiques (MPQ)

CNRS / Université Paris Cité

Institut Néel (NEEL)

CNRS

Physique des lasers, atomes et molécules (PhLAM)

CNRS / Université de Lille

Unité de recherche Soleil (SOLEIL)

CNRS

Service de physique de l'état condensé (SPEC)

CEA / CNRS

Spintronique et technologie des composants (SPINTEC)

CNRS / CEA / Université Grenoble Alpes

Surface du verre et interface (SVI)

CNRS / Saint Gobain Recherche

Unité mixte de physique CNRS/Thalès (UMPhy)

CNRS / Thalès

MajuLab

CNRS / Sorbonne Université / Université Côte d'Azur /
Université nationale de Singapour / Université technolog-
ique de Nanyang

2021

UNE ANNÉE AVEC LE CNRS

à l'Institut de physique

est un complément au rapport d'activité **2021, une année avec le CNRS**

www.inp.cnrs.fr



Photo de couverture :
Vue d'artiste d'une fusion trou noir-étoile à neutrons.
© Carl Knox, OzGrav - Swinburne University





CNRS - INSTITUT DE PHYSIQUE

3 rue Michel Ange
75794 Paris Cedex 16

www.inp.cnrs.fr

Responsable éditorial : Marie Signoret

Conception : Linda Salvanesci, Pascale Roubin, Vincent Planchenault

Impression : CNRS DR1 IFSEM secteur de l'imprimé

Novembre 2022