



2017

en direct des laboratoires de  
**l'Institut de physique**



[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)



Année après année, nous vous offrons à la fin du mois de mars une rétrospective des actualités scientifiques de l'année précédente. Ne vous y trompez pas, habitude ne veut pas dire routine. Vous avez en main la nouvelle édition de ce fascicule, remarquable à double titre.

D'une part, les actualités rassemblées ici forment une illustration de la richesse et du dynamisme des recherches menées au sein des laboratoires qui relèvent de l'Institut de physique. Le champ d'application de la physique est en effet très large, allant des particules élémentaires à la cosmologie, en passant par les sciences de la matière et des ondes. Il se prolonge jusqu'aux micro-technologies et aux processus chimiques et biologiques. Parce que la physique n'est pas définie uniquement par l'objet qu'elle étudie, mais aussi par l'approche, la méthode et les outils qu'elle utilise, nous encourageons fortement les recherches interdisciplinaires. Les physiciens conçoivent ainsi des méthodes et outils (instruments, logiciels et approches théoriques) qui serviront ensuite à d'autres communautés scientifiques.

D'autre part, le processus mis en place pour concevoir et travailler ces actualités a permis d'impliquer nombre d'entre vous dans cette action de communication scientifique destinée à faire connaître des avancées scientifiques à un public plus large et moins averti. C'est aujourd'hui une nécessité !

Ainsi, chaque actualité présentée ici est le fruit d'un travail collectif qui commence au cœur des laboratoires : lorsque les résultats de recherche sont identifiés par leurs auteurs comme suffisamment remarquables, ceux-ci alertent la cellule communication de l'Institut de physique, en général par l'intermédiaire du correspondant communication du laboratoire. S'en suivent des échanges fructueux avec la direction scientifique de l'institut, le service de presse du CNRS, les partenaires et, bien sûr, avec l'équipe de recherche impliquée. L'aboutissement de ce processus, à savoir les actualités scientifiques et « innovations », les communiqués de presse, alertes et articles, se retrouve aujourd'hui dans vos mains... ainsi que sur notre site web et les réseaux sociaux.

Vous accéderez également *via* ce site, qui prépare sa mue et se présentera courant 2018 sous une nouvelle interface, aux documents pratiques liés à ce travail collectif de valorisation des recherches, à savoir les fiches *Comment publier ?* et *Communiquer sur un résultat scientifique à l'INP*, entre autres.

Bonne lecture !

**Alain Schuhl**  
Directeur de l'Institut de physique du CNRS



# SOMMAIRE

## THÉMATIQUES



5

SPATIAL - ASTRONOMIE



11

SONDER LA MATIÈRE



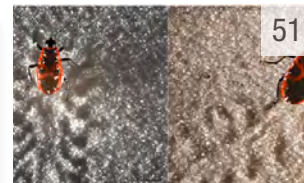
25

ÉCHELLE NANO &  
PARTICULES UNIQUES



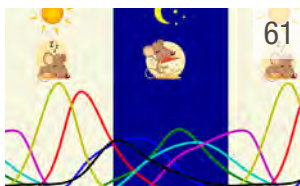
37

TRANSITIONS DE PHASE  
& ORDRE ET DÉSORDRE



51

GRAINS, FLUIDES  
ET SOLIDES



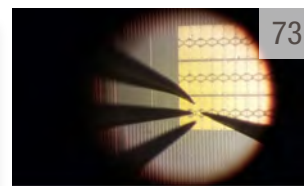
61

PHYSIQUE ET VIVANT



69

INNOVATION



73

INTERFACE



THÉMATIQUES



5

SPATIAL - ASTRONOMIE



11

SONDER LA MATIÈRE



25

ÉCHELLE NANO &  
PARTICULES UNIQUES



37

TRANSITIONS DE PHASE  
& ORDRE ET DÉSORDRE



51

GRAINS, FLUIDES  
ET SOLIDES



61

PHYSIQUE ET VIVANT



69

INNOVATION



73

INTERFACE



# Institut de physique

## Communiqués de presse

### Ondes gravitationnelles : première détection conjointe LIGO-Virgo septembre 2017

Les scientifiques des collaborations LIGO et Virgo ont observé, pour la première fois avec trois détecteurs, des ondes gravitationnelles émises lors de la fusion de deux trous noirs. Ce résultat confirme le bon fonctionnement de l'instrument Advanced Virgo, qui s'est joint aux observations des deux détecteurs LIGO le 1<sup>er</sup> août et dont c'est la première détection. Il ouvre la voie à une localisation bien plus précise des sources d'ondes gravitationnelles. Cette première fait l'objet d'une publication de la collaboration internationale exploitant les trois détecteurs, qui comprend des équipes du CNRS, à paraître dans la revue *Physical Review Letters*. Elle a été exposée lors d'un point presse en marge de la réunion du G7-science le 27 septembre 2017 à Turin. Le CNRS a décerné le même jour une double médaille d'or aux physiciens Alain Brillet et Thibault Damour pour leurs contributions majeures à la détection des ondes gravitationnelles.

Les trous noirs sont le stade ultime de l'évolution des étoiles les plus massives. Il arrive que certains évoluent en couple. Ils orbitent alors l'un autour de l'autre et se rapprochent lentement en perdant de l'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles, un phénomène qui finit par s'accélérer brusquement jusqu'à les faire fusionner en un trou noir unique. Un tel tourbillon final avait déjà été observé trois fois par les détecteurs LIGO en 2015 et début 2017. Cette fois ce sont trois instruments qui en ont été témoins, le 14 août 2017 à 10h30 UTC, permettant une bien meilleure localisation dans le ciel.

Ce nouvel événement confirme que les couples de trous noirs sont relativement abondants et va contribuer à leur étude. Les deux trous noirs, qui avaient des masses égales à 25 et 31 fois celle du Soleil, ont fusionné en un trou noir de 53 masses solaires, l'équivalent de 3 masses solaires ayant été converties en énergie sous forme d'ondes gravitationnelles. Cet événement s'est produit à environ 1,8 milliard d'années-lumière de la Terre ; autrement dit, les ondes gravitationnelles se sont propagées dans l'espace pendant 1,8 milliard d'années avant d'être détectées par le détecteur Advanced LIGO situé en Louisiane (États-Unis), puis 8 millièmes de seconde plus tard par celui situé dans l'État de Washington, et enfin 6 millièmes de seconde après par Advanced Virgo situé près de Pise en Italie.

L'apport d'un troisième instrument, Advanced Virgo, permet d'améliorer significativement la localisation des événements astrophysiques à l'origine des ondes gravitationnelles. Ces événements, extrêmement violents, peuvent dans certains cas éjecter de la matière très chaude qui peut être visible pour des télescopes optiques. Avec seulement deux détecteurs d'ondes gravitationnelles, la zone de recherche dans le ciel s'étendait sur une zone équivalant à plusieurs milliers de fois la surface de la pleine Lune. Grâce à Advanced Virgo, elle est environ dix fois plus petite, et l'estimation de la distance à laquelle se trouve la source est aussi deux fois meilleure. Ceci améliore grandement les chances d'observer des signaux avec d'autres instruments.

Pour cet événement, la combinaison des temps d'arrivée avec l'amplitude des signaux observés a permis d'établir une zone de recherche dans le ciel de 60 degrés carré, qui a été scrutée par 25 groupes d'astronomes. Comme pour les précédents événements, aucun signal optique n'a été observé.

Un autre atout du détecteur Virgo est son orientation, différente de celle des deux instruments LIGO. Ceci rend possible de nouveaux tests de la théorie de la relativité générale, élaborée par Albert Einstein, qui décrit la force de gravitation. En effet, cette théorie prédit que lors du passage d'une onde gravitationnelle, l'espace s'étire dans une direction tout en se contractant dans une autre, au lieu, par exemple, de se déformer dans une seule direction ou dans toutes les directions à la fois comme le prédisent des théories alternatives. L'analyse des signaux observés indique que c'est effectivement le cas. C'est un prélude à de futurs tests plus poussés de la relativité générale.

En attendant de nouvelles observations à l'automne 2018, les premières données de ce réseau de trois détecteurs sont toujours en cours d'analyse et devraient donner lieu prochainement à d'autres annonces.

Advanced Virgo est un instrument principalement cofinancé par le CNRS en France et l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) en Italie. Les chercheurs travaillant sur Virgo sont regroupés au sein de la collaboration du même nom, comprenant plus de 250 physiciens, ingénieurs et techniciens appartenant à 20 laboratoires européens dont 6 au CNRS en France, 8 à l'INFN en Italie et 2 à Nikhef aux Pays-Bas. Les autres laboratoires sont Wigner RCP en Hongrie, le groupe POLGRAW en Pologne, un groupe à l'université de Valence (Espagne) et EGO (European Gravitational Observatory), près de Pise, en Italie, où est implanté l'interféromètre Virgo. Après plusieurs années de travaux d'amélioration et quelques mois de tests, Advanced Virgo a recommencé à écouter le ciel le 1<sup>er</sup> août 2017, rejoignant Advanced LIGO. Cette détection est l'aboutissement d'un quart de siècle d'investissements du CNRS et de l'INFN dans ce grand équipement.

LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) est un observatoire dédié aux ondes gravitationnelles composé de deux interféromètres identiques, situés aux États-Unis. La version améliorée de ces détecteurs (Advanced LIGO) a redémarré en septembre 2015. Autour de ces instruments s'est constituée la collaboration scientifique LIGO (LIGO Scientific Collaboration, LSC), un groupe de plus de 1000 scientifiques travaillant dans des universités aux États-Unis et dans 14 autres pays. Elle travaille main dans la main avec la collaboration Virgo. En effet, depuis 2007, les scientifiques des deux groupes analysent en commun les données et signent ensemble les découvertes.

La publication scientifique des collaborations LIGO et Virgo annonçant cette observation est cosignée par 76 scientifiques de six équipes du CNRS et d'universités associées : le laboratoire Astroparticule et cosmologie (CNRS/Université Paris Diderot/CEA/Observatoire de Paris), à Paris ; le laboratoire Astrophysique relativiste, théories, expériences, métrologie, instrumentation, signaux (CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur/Université Nice Sophia Antipolis), à Nice ; le Laboratoire de l'accélérateur linéaire (CNRS/Université Paris-Sud), à Orsay ; le Laboratoire d'Annecy de physique des particules (CNRS/Université Savoie Mont Blanc), à Annecy ; le Laboratoire Kastler Brossel (CNRS/UPMC/ENS/Collège de France), à Paris ; le Laboratoire des matériaux avancés (CNRS), à Villeurbanne.

Le CNRS a décerné le 27 septembre 2017 une double médaille d'or aux physiciens Alain Brillet et Thibault Damour pour leurs contributions majeures à la détection des ondes gravitationnelles.

Contact chercheur : Benoît Mours, [mours@lapp.in2p3.fr](mailto:mours@lapp.in2p3.fr)





# Institut de physique

Communiqués de presse

## Les premiers résultats du satellite MICROSCOPE confirment la théorie d'Albert Einstein avec une précision inégalée

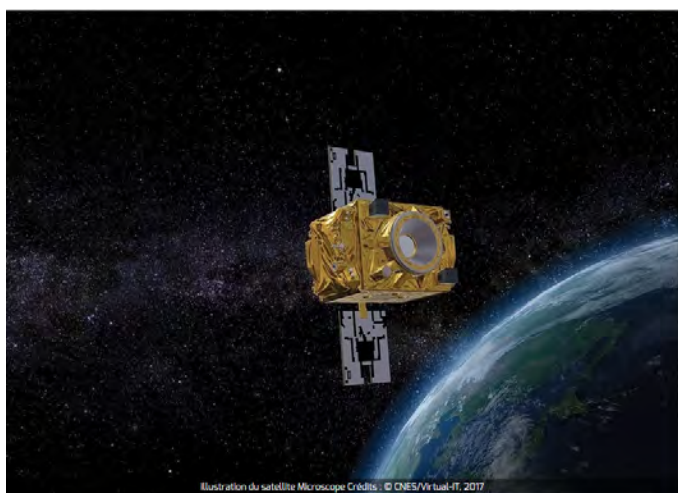
décembre 2017

Alors que la meilleure mesure du Principe d'équivalence n'avait pas été dépassée depuis 10 ans, les premiers résultats du satellite MICROSCOPE du CNES, équipé des accéléromètres de l'ONERA, permettent de faire aujourd'hui 10 fois mieux. Ils démontrent, avec une précision inégalée, soit  $2.10^{-14}$ , que les corps tombent dans le vide avec la même accélération. Le principe d'équivalence demeurant à ce stade inébranlable, il s'agit rien de moins que d'une nouvelle confirmation de la Relativité générale proposée par Albert Einstein il y a plus d'un siècle. Ce résultat obtenu par l'ONERA et les équipes de Geoazur (CNRS-OCA-Université Côte d'Azur-IRD) avec la contribution du CNES, du ZARM est rapporté dans la prestigieuse revue scientifique *PRL*.

libre et donc le principe d'équivalence sont des principes non violés. MICROSCOPE (MICROSatellite à trainée Compensée pour l'Observation du Principe d'Équivalence) a été lancé le 25 avril 2016. La phase des mesures scientifiques a débuté en décembre 2016 et permis la collecte de 1.900 orbites utiles à la mesure du Principe d'équivalence. C'est l'équivalent d'une chute de 85 millions de km, la moitié de la distance Terre-Soleil.

« La performance du satellite est bien meilleure que prévue. Plus de 1.900 orbites supplémentaires sont déjà disponibles, d'autres à venir, et devraient ainsi améliorer la performance de la mission pour se rapprocher de l'objectif de  $10^{-15}$ . Ce premier résultat a une portée mondiale pour la physique et va certainement déboucher sur la révision des théories alternatives à la Relativité générale » a commenté Pierre Touboul, responsable scientifique de la mission.

Contact chercheur : Serge Reynaud, [sr@spectro.jussieu.fr](mailto:sr@spectro.jussieu.fr)



Selon cette théorie, espace et temps sont liés dans un espace-temps à quatre dimensions et la gravitation résulte d'une courbure de cet espace-temps déformé par la matière. Cette théorie de la gravitation a été encore vérifiée expérimentalement par la détection récente des ondes gravitationnelles. Mais la théorie quantique des champs, autre grande théorie du 20<sup>ème</sup> siècle, qui décrit de manière extrêmement fidèle le monde des particules et de l'infiniment petit, semble inconciliable avec la Relativité Générale. La recherche d'une théorie universelle « de la gravitation » et « quantique » est le Graal des physiciens du 21<sup>ème</sup> siècle. Certaines théories candidates prédisent une violation du principe fondateur de la Relativité Générale, l'équivalence entre gravitation et accélération, à un niveau très faible. MICROSCOPE repousse les limites d'un éventuel défaut de cette équivalence et apporte de nouvelles contraintes aux théories d'extension de la Relativité Générale.

Après avoir analysé seulement 10 % des données acquises, l'équipe qui analyse les données de MICROSCOPE, améliore la précision du test du Principe d'Equivalence d'un facteur 10 ! Ce résultat obtenu par l'ONERA et les équipes de Geoazur (CNRS-OCA-Université Côte d'Azur-IRD) avec la contribution du CNES, du ZARM est rapporté dans la prestigieuse revue scientifique *PRL*. Il permet de confirmer que l'universalité de la chute



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Une expérience de pensée : la téléportation quantique aux alentours d'un trou noir

Octobre 2017

Des physiciens ont réussi à prédire que les effets de gravité au bord d'un trou noir empêchent la réalisation d'une téléportation quantique dans cet espace.

Plusieurs travaux théoriques récents étudient les effets de la gravité sur des systèmes quantiques, en particulier aux abords des trous noirs. Les trous noirs sont des corps célestes tellement denses qu'ils piègent matière et information qui passent à proximité. La région du trou noir autour de laquelle aucune information ne peut ressortir est délimitée, comme circonscrite par une frontière. En deçà, il est impossible de communiquer vers l'extérieur. Des chercheurs ont alors imaginé une expérience de pensée afin d'imaginer ce qu'il se passerait si on cherchait à transmettre de l'information au travers d'un tel trou noir en utilisant un protocole de téléportation quantique. Ces travaux sont publiés dans la revue *Classical and quantum gravity*.

Le protocole de téléportation quantique a été utilisé avec succès dans de nombreuses expériences de laboratoire. Il consiste à transférer un

état quantique d'un système donné vers un autre système semblable, mais situé à un autre endroit, en utilisant les propriétés de l'intrication quantique. Ainsi en utilisant tous les ingrédients de la théorie quantique des champs pour décrire le système initial et une représentation simplifiée de la gravitation, les physiciens sont arrivés à la conclusion que ce transfert serait compromis. Dans le cas de leurs travaux, des chercheurs de l'institut UTINAM ont revisité cette expérience de pensée en considérant non plus une théorie simplifiée de la gravité mais en traitant de façon plus complète la description du trou noir. Ils ont réexaminé les phénomènes d'intrication et le protocole de la téléportation quantique aux abords d'un trou noir et ont démontré que le résultat serait toujours négatif. Les physiciens ont ensuite étudié l'efficacité de ce transfert d'information en fonction de la façon dont le système initial est positionné par rapport au trou noir. Ils ont ainsi montré que la distance sous laquelle il devient impossible de téléporter l'information dans de bonnes conditions dépend des vitesses avec lesquelles le système tourne autour du trou noir et est attiré par celui-ci.

L'observation des trous noirs s'avère très difficile et des expériences réelles sur ces corps célestes ne seront pas pour demain. De telles expériences de pensée permettent de sonder la physique quantique des trous noirs et participent à une meilleure compréhension de cette physique complexe.

### En savoir plus

[Adiabatic transport of qubits around a black hole](#)

David Viennot et Olivia Moro

*Classical and Quantum Gravity* (2017), doi:10.1088/1361-6382/aa5b5c

Lire l'article sur la base d'archives ouvertes [arXiv](#)

### Contact chercheur

David Viennot, Maître de conférences à l'Université de Franche-Comté

### Informations complémentaires

Institut UTINAM (CNRS/Univ. Franche-Comté)

cnrs

www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp



# Institut de physique

Communiqués de presse

## Les molécules sont-elles droitières ou gauchères ?

décembre 2017

Quand le signal de départ est donné, deux électrons s'élancent dans des directions opposées. Celui qui remporte la course a une avance d'à peine sept attosecondes. Soit sept précédé de 17 zéros avant la virgule, ou  $7 \times 10^{-18}$  seconde. Une différence si petite que jusqu'à présent il était impossible de la mesurer. Pourtant, elle constitue une signature des molécules dont s'échappent les électrons : la chiralité. Cette mesure d'une précision inouïe a été réalisée par une équipe internationale de recherche (INRS/CNRS/CEA/UPMC/Université de Bordeaux/Institut Weizmann) [...]. Les équations théoriques prédisaient le phénomène, mais personne n'avait pu le prouver. [...]

Centre lasers intenses et applications

Contact chercheur : Yann Mairesse, [yann.mairesse@u-bordeaux.fr](mailto:yann.mairesse@u-bordeaux.fr)

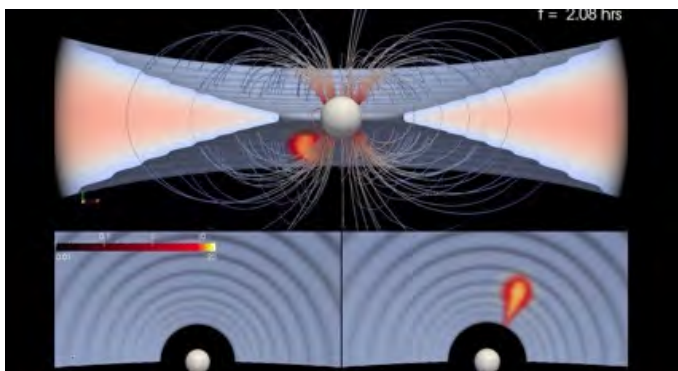
## Fin du mystère de l'accrétion de la matière autour des étoiles naissantes

novembre 2017

Des chercheurs du Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI, École Polytechnique/UPMC/CEA/CNRS) sont parvenus à observer et caractériser, grâce à l'utilisation de lasers et à l'observation des émissions de rayons X, la manière par laquelle la matière s'accumule à la surface d'un astre au cours de sa formation, depuis une nébuleuse gazeuse jusqu'à devenir une étoile pleinement formée comme notre Soleil.

Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses

Contact chercheur : Julien Fuchs, [julien.fuchs@polytechnique.fr](mailto:julien.fuchs@polytechnique.fr)



Simulation du phénomène d'accrétion dans les étoiles jeunes © S. Orlando (Inaf-Palermo, Italie)

## Des mers effervescentes sur Titan

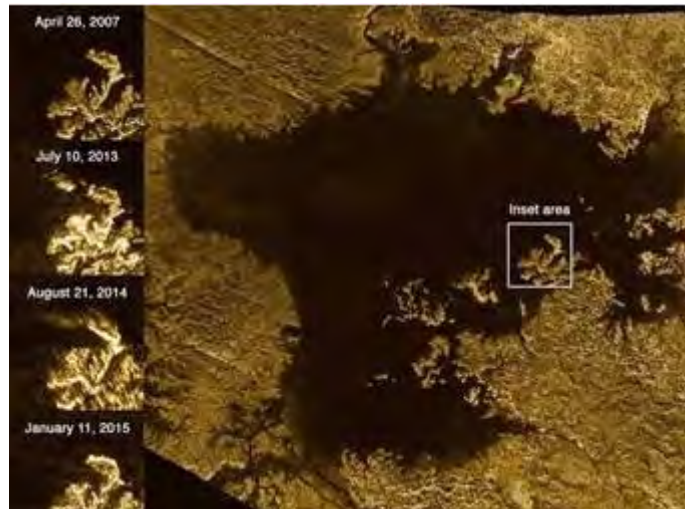
novembre 2017

La mission Cassini-Huygens a révélé sur Titan, le plus grand satellite de Saturne, l'existence de mers probablement constituées de méthane, d'éthane et de diazote. Détecté en 2013, un phénomène jusqu'alors inexpliqué laissait apparaître puis disparaître des régions de surbrillance

dans la mer Ligeia Mare, selon les images rapportées par le radar de l'orbiteur Cassini. Ce mystérieux phénomène surnommé « Magic Islands » a finalement trouvé une explication. [...]

Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique

Contact chercheur : Daniel Cordier, [daniel.cordier@univ-reims.fr](mailto:daniel.cordier@univ-reims.fr)



Crédits : NASA/JPL-Caltech/ASI/Cornell

## Reproduire la formation de la matière organique dans le système solaire primitif

janvier 2017

Reproduire en laboratoire la formation de la matière organique, c'est le défi réalisé par des chercheurs de l'IMPMC (CNRS/MNHN/UPMC/IRD) et du laboratoire METIS (CNRS/UPMC/EPHE) [...]. Cette expérience ouvre pour la première fois une piste expérimentale pour interpréter la composition isotopique en hydrogène de ces météorites qui présente une « anomalie », une signature caractéristique, dont l'origine est toujours inconnue. [...]

Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie

Contact chercheur : François Robert, [francois.robert@ens-lyon.fr](mailto:francois.robert@ens-lyon.fr)

## Climat : une avancée majeure pour la simulation des événements extrêmes

décembre 2017

L'étude quantitative des événements climatiques extrêmes [...] est l'un des défis contemporains les plus importants à relever. [...] Des chercheurs du Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon (CNRS/Université Lyon 1/ENS Lyon) proposent un nouvel algorithme dont le but est de réduire d'un facteur cent à mille, les temps de calculs associés à la modélisation de ces phénomènes. [...]

Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon

Contact chercheur : Freddy Bouchet, [freddy.bouchet@ens-lyon.fr](mailto:freddy.bouchet@ens-lyon.fr)



THÉMATIQUES



5

SPATIAL - ASTRONOMIE



11

SONDER LA MATIÈRE



25

ÉCHELLE NANO & PARTICULES UNIQUES



37

TRANSITIONS DE PHASE & ORDRE ET DÉSORDRE



51

GRAINS, FLUIDES ET SOLIDES



61

PHYSIQUE ET VIVANT



69

INNOVATION



73

INTERFACE



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Des électrons pour sonder les modes vibrationnels d'une molécule

Juillet 2017

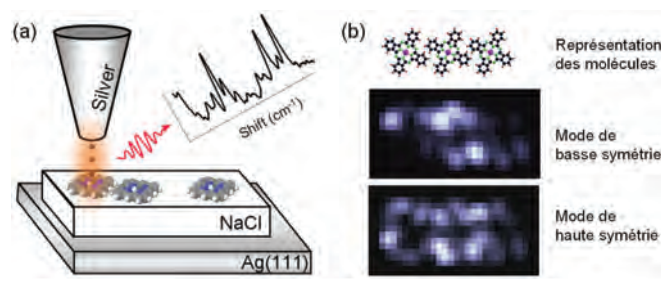
Des physiciens ont réussi à cartographier l'empreinte des modes vibrationnelles à l'échelle atomique d'une molécule unique grâce à l'utilisation d'une pointe STM. Ces travaux de recherche constituent un pas décisif vers une spectroscopie des modes vibrationnels à l'échelle subnanométrique.

Depuis l'avènement des lasers, les chercheurs sondent la matière en recherchant toujours plus de sensibilité et de résolution. De nombreuses techniques de spectroscopie basées sur la détection de fluorescence induite par excitation lumineuse se sont développées au fur et à mesure de l'avancée des technologies. Il est aujourd'hui facile d'obtenir l'empreinte des modes vibrationnels grâce à des spectroscopies type Raman et ses dérivés. Cependant, ces spectroscopies sont limitées par la résolution spatiale. Plus récemment ce sont développés les techniques de microscopie à effet tunnel permettant de venir sonder la matière à l'aide d'électrons émis d'une fine pointe métallique. Des physiciens de l'Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg (IPCMS, CNRS/Univ. Strasbourg) ont réussi à combiner la résolution spatiale subatomique du STM avec une mesure spectrométrique des modes vibrationnels d'une molécule unique. Ils ont pu distinguer des variations du spectre de raies en fonction de la sous-partie de la molécule sondée. En d'autres termes, l'empreinte

spectrale change en fonction du groupement d'atomes considéré. Ces travaux ont été publiés dans *Physical Review Letters*.

Pour cela, ils ont utilisé un microscope à effet tunnel, un instrument qui se compose d'une pointe effilée qui sert de sonde et qui balaye ligne après ligne une surface afin d'en déterminer sa topographie à l'échelle atomique. L'excitation de la molécule est induite par l'absorption de l'énergie des électrons et la molécule se désexcite en émettant de la fluorescence mesurée par un spectromètre de haute sensibilité. Compte-tenu de la faiblesse des signaux, les chercheurs travaillent sous ultra-vide et à température de l'hélium liquide. Les variations du spectre optique en fonction du positionnement fin de la pointe par rapport à la molécule sont enregistrées permettant de tracer une carte des spectres en fonction du point d'excitation sur la molécule. L'intensité des raies présente des variations selon la zone de la molécule sondée, et selon l'origine de la raie considérée. En effet, chaque raie correspond à un mode de vibration de la molécule bien déterminé. L'étude montre que les raies associées à des modes de même symétrie présentent des dépendances spatiales identiques. L'étape ultime de ce travail consiste en la réalisation de cartes montrant la variation spatiale de l'intensité d'émission de différentes raies (cf. figure). L'interprétation fine des structures observées au sein de ces cartes nécessitera la mise en place de nouveaux modèles théoriques.

Cette expérience ouvre la voie à une nouvelle forme de nano-spectroscopie optique permettant de voir directement au cœur des molécules, un concept nouveau qui bouscule notre compréhension de ce qu'est le spectre de fluorescence d'une molécule.



(a) Le courant tunnel (points blancs) agit comme une source d'excitation ponctuelle d'un spectre de fluorescence de raie d'une molécule. (b) Cartographie optique de modes de haute et basse symétrie d'un groupement de trois molécules.

## En savoir plus

[Vibronic spectroscopy with sub-molecular resolution from STM-induced electroluminescence](#)

B. Doppagne, M. C. Chong, E. Lorchat, S. Berciaud, M. Romeo, H. Bulou, AL. Boeglin, F. Scheurer et G. Schull

*Physical Review Letters* (2017), doi:10.1103/PhysRevLett.118.127401

## Contact chercheur

Guillaume Schull, CNRS

## Informations complémentaires

Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg (IPCMS, CNRS/Univ. Strasbourg)



www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp

Illustration du bandeau : © Emmanuel Perrin/CNRS Photothèque



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Nouvelle source d'électrons pour la microscopie électronique

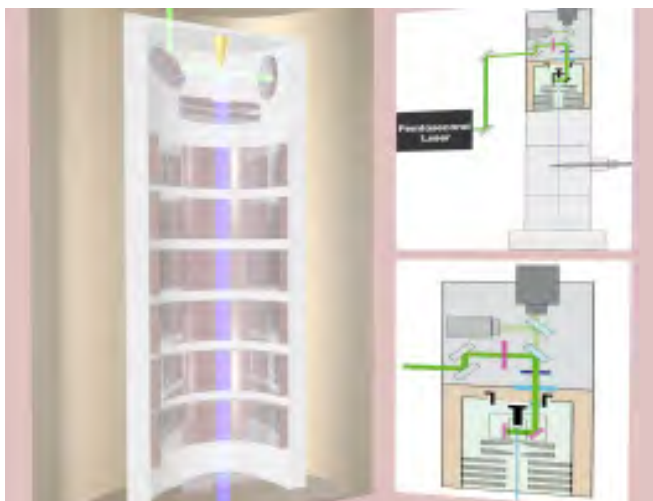
Décembre 2017

En combinant un canon à émission de champ froide avec un laser femtoseconde, des physiciens ont développé une nouvelle source ultrabrève d'électrons pour la microscopie électronique ultrarapide cohérente.

En microscopie électronique en transmission, un faisceau d'électrons accélérés provenant d'une pointe traverse l'échantillon à analyser. Selon les caractéristiques de l'échantillon (composition, structure), l'intensité du faisceau est modifiée, ce qui nous renseigne sur l'objet observé. Parmi les différentes sources d'électrons, les sources à émission de champ froide (la pointe reste à température ambiante) sont utilisées dans le cas d'analyses nécessitant une qualité optimale de faisceau électronique. Leur fonctionnement repose sur une nanopointe métallique placée dans un champ électrique suffisamment fort pour permettre l'extraction d'électrons par effet tunnel. L'émission des électrons étant confinée à l'extrémité de la pointe métallique, ces sources sont celles dont la brillance (qui traduit le nombre de particules émises dans une direction donnée par unité de surface émettrice), la cohérence spatiale et temporelle sont les meilleures. Elles sont donc idéales pour les

expériences d'interférométrie ou d'holographie électronique utilisées pour cartographier quantitativement les champs électriques, magnétiques ou de déformation dans les nanostructures.

Depuis une dizaine d'années, des efforts importants visent à combiner la résolution spatiale atomique des microscopes électroniques en transmission avec la résolution temporelle femtoseconde des sources lasers ultra-brèves. Ces développements ont permis des avancées importantes dans l'imagerie des nanoobjets avec une excellente résolution spatio-temporelle. Cependant, la quasi-totalité de ces travaux repose sur l'utilisation de paquets d'électrons émis par des photocathodes plates illuminées par des impulsions lasers femtosecondes. La faible brillance de ces sources limite leur champ d'application. Des chercheurs du Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales de Toulouse (CEMES-CNRS) ont conçu et mis au point une nouvelle source d'électrons ultrabrève en modifiant puis combinant un canon à émission de champ froide avec un laser femtoseconde focalisé sur l'extrémité de la nano-pointe métallique. Cette nouvelle source de paquets d'électrons ultracourts (de l'ordre de 200 femtosecondes) permet de dépasser les limites des photocathodes. Cela ouvre des perspectives totalement nouvelles pour la microscopie électronique résolue en temps, comme l'holographie électronique femtoseconde qui permettra la cartographie quantitative ultrarapide des champs dans les nanoobjets (champs électromagnétiques, champs de contraintes, ...). Ces résultats ont été publiés dans la revue *Applied Physics Letters*.



*En microscopie électronique conventionnelle, les sources à émission de champ à froid sont privilégiées pour les applications les plus exigeantes en raison de leur excellente brillance, cohérence spatiale et dispersion énergétique. Des chercheurs du CEMES ont mis au point une version ultrarapide de ces sources ouvrant ainsi la voie à l'interférométrie électronique ultrarapide.*

## En savoir plus

Development of an ultrafast electron source based on a cold-field emission gun for ultrafast coherent TEM

G. Mario Caruso, F. Houdellier, P. Abeilhou et A. Arbouet

*Applied Physics Letters* (2017), doi:10.1063/1.4991681

## Contacts chercheurs

Arnaud Arbouet, chargé de recherche CNRS

Florent Houdellier, ingénieur de recherche CNRS

## Informations complémentaires

Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales (CEMES, laboratoire du CNRS associé à l'Université Paul Sabatier de Toulouse et à l'INSA Toulouse)

cnrs

www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp

Illustration du bandeau : © Emmanuel Perrin/CNRS Photothèque



### Cartographie de la transition magnétique dans un alliage FeRh

Octobre 2017

Grâce à l'holographie électronique, des physiciens ont observé pour la première fois le changement d'état magnétique de couches minces de FeRh, sous l'effet de la température. Ils ont ainsi mis en évidence la non homogénéité spatiale de cette transition, due notamment à l'influence des interfaces.

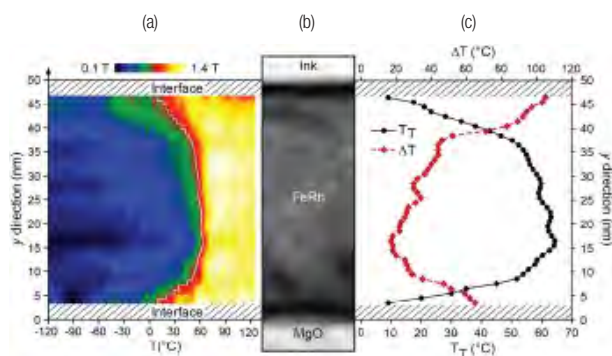
Un composé comme FeRh (alliage Fer et Rhodium) transite d'un état antiferromagnétique ("AF" à aimantation nulle) à ferromagnétique ("F" à aimantation non nulle) aux alentours de 100 °C. Or, la connaissance et le contrôle de l'état magnétique d'un composé ferromagnétique en fonction de la température est essentiel pour le développement de nouveaux dispositifs magnétiques, en particulier ceux utilisés pour l'enregistrement thermiquement activé. Les mécanismes impliqués lors de la transition F/AF sont cependant très controversés et n'ont été étudiés expérimentalement qu'en surface des échantillons.

Pour mieux les connaître, les chercheurs ont réalisé pour la première fois une cartographie quantitative de l'induction en fonction de la température de l'intérieur d'une couche mince (50 nm) de FeRh obtenue par croissance épitaxiale sur un substrat d'oxyde de magnésium. Pour dresser cette carte, ils ont utilisé l'holographie électronique, une technique originale de microscopie électronique en transmission. Il s'agit de faire interférer

un faisceau d'électrons rapides ayant interagit avec l'échantillon, et un faisceau de référence. La figure d'interférence obtenue révèle l'état magnétique du matériau. Les chercheurs ont associé cette technique avec un contrôle *in situ* de la température de l'objet étudié. Cela leur a permis d'observer l'évolution de l'aimantation dans l'échantillon en fonction de la température, avec une résolution spatiale de l'ordre du nanomètre.

Cette étude a révélé que la transition magnétique se fait de façon non homogène dans la couche mince. Lorsque l'on se déplace le long de son axe de croissance, la température de transition magnétique évolue : elle décroît notamment à proximité des interfaces de la couche de FeRh (cf. Figure a). Par ailleurs, l'amplitude de température nécessaire pour que la transition s'effectue varie également (cf. Figure c). Ces résultats mettent en évidence les effets de la surface du film et ceux de l'interface avec le substrat. Les chercheurs ont également observé, au cours de cette transition, la formation de domaines ferromagnétiques périodiques qui s'étendent à l'approche de la transition de la phase antiferromagnétique vers la phase ferromagnétique dans le plan du film mince.

Au-delà de ces résultats sur les mécanismes fondamentaux de transition F/AF, ce travail apporte une nouvelle illustration de l'intérêt du développement des expériences d'holographie électronique sous sollicitation, ici par le contrôle de la température. Le développement d'études similaires, mais sous champ électrique cette fois, apportera des informations sur le couplage magnéto-électrique dans des composés multiferroïques, pressentis pour des applications en électronique de spin, mais aussi pour l'étude de composants de la microélectronique.



(a) Variation de l'aimantation en fonction de la température et de la position dans la couche de FeRh ; (b) Image de la couche de FeRh élaborée sur substrat MgO ; (c) Profil de la température de transition (en noir) et de la variation de température pour obtenir la transition complète de la couche (en rouge) en fonction de la position de celle-ci par rapport au substrat.

### En savoir plus

Inhomogeneous spatial distribution of the magnetic transition in an iron-rhodium thin film

G. Gatel, B. Warot-Fontrose, N. Biziere, L.A. Rodriguez, D. Reyes, R. Cours, M. Castiella et M.J. Casanove

*Nature Communications* (2017), doi:10.1038/ncomms15703

### Contact chercheur

Christophe Gatel, maître de conférences à l'Université Paul Sabatier et chercheur au CEMES

### Informations complémentaires

Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales (CEMES, laboratoire CNRS associé à Univ. Paul Sabatier et INSA Toulouse)





### Cartographier dans l'espace réel l'ordre antiferromagnétique aux échelles nanométriques

Octobre 2017

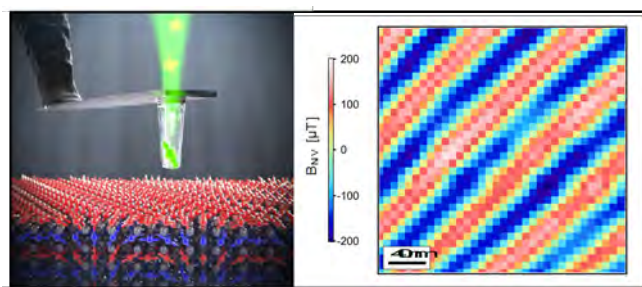
En utilisant un atome artificiel dans le diamant comme détecteur de champ magnétique ultrasensible, des physiciens ont imagé pour la première fois le champ de fuite rayonné par un composé de la vaste famille des antiferromagnétiques. Cette observation leur a permis d'étudier l'effet d'un champ électrique sur la modulation sinusoïdale de l'ordre antiferromagnétique dans un matériau multiferroïque.

Alors que les physiciens disposent d'un grand nombre de techniques de microscopie pour analyser les propriétés des matériaux ferromagnétiques – lesquels sont devenus omniprésents dans notre vie quotidienne (moteurs, transformateurs, mémoires...) – la très vaste famille des matériaux antiferromagnétiques reste en revanche très difficile à étudier. Dans de tels matériaux, l'alignement antiparallèle des spins résulte en une aimantation quasiment nulle, conduisant à des champs de fuite extrêmement faibles qui ne peuvent pas être détectés par les techniques de microscopie magnétique conventionnelles. Seules des méthodes de caractérisation lourdes, par exemple basées sur les neutrons produits par des réacteurs nucléaires ou sur des sources de rayonnement synchrotron, permettent d'extraire de façon indirecte des informations sur leurs propriétés magnétiques aux échelles nanométriques. Les composés antiferromagnétiques restent ainsi mal compris. Ceci constitue un problème considérable à l'heure où les physiciens nourrissent l'espoir que l'utilisation de matériaux antiferromagnétiques puisse permettre de dépasser toutes les limites auxquelles sont confrontés les dispositifs spintroniques à base de composants ferromagnétiques, en offrant des capacités de stockage plus denses, en raison du très faible champ de fuite, mais également un accès plus rapide aux données à faible

coût énergétique.

En exploitant l'extrême sensibilité d'un magnétomètre quantique basé sur un centre coloré NV individuel dans le diamant, une équipe de chercheurs associant le laboratoire Charles Coulomb de Montpellier, l'unité mixte de physique CNRS/Thales, le C2N, le CEA et SOLEIL à Paris-Saclay et l'Université de Bâle en Suisse, a imagé le champ de fuite rayonné par l'ordre antiferromagnétique dans un matériau multiferroïque, le  $\text{BiFeO}_3$ . La cartographie quantitative de champ magnétique est réalisée à température ambiante en mesurant le décalage Zeeman de l'état de spin électronique d'un centre NV unique à l'aide d'une excitation simultanée par un laser et un champ radiofréquence. Pour cela, le centre NV est implanté à l'extrémité d'une pointe en diamant, laquelle est intégrée dans un dispositif de microscopie à force atomique afin de pouvoir balayer la sonde NV à la surface de l'échantillon antiferromagnétique. Les images magnétiques obtenues révèlent sans ambiguïté l'existence d'une modulation sinusoïdale de l'ordre antiferromagnétique dans un film mince de  $\text{BiFeO}_3$ , avec une période d'environ 70 nm. Une analyse détaillée de l'amplitude du champ magnétique a permis d'identifier une source inattendue de moments magnétiques non compensés. Ils pourraient résulter de l'exaltation d'une interaction de type Dzyaloshinskii–Moriya causé par la brutale rupture de symétrie d'inversion à la surface de l'échantillon. Outre son ordre magnétique, le  $\text{BiFeO}_3$  possède également un ordre électrique (il est ferroélectrique) qui permet de contrôler la direction des spins par application d'une tension de quelques volts. Les chercheurs ont pu également caractériser en détail les modifications de la structure de spin sous tension, ouvrant ainsi la voie vers l'étude de nouveaux nano-objets magnétiques se formant par exemple à l'intersection entre deux sinusoïdes antiferromagnétiques, créables et effaçables à volonté par application d'un modeste champ électrique.

Ces travaux publiés dans la revue *Nature* illustrent de façon frappante le potentiel des capteurs quantiques pour explorer des problématiques de la physique de la matière condensée.



(gauche) Un atome artificiel (centre NV représenté par la flèche verte) inséré dans une pointe en diamant est utilisé pour cartographier le champ magnétique rayonné par un matériau antiferromagnétique. Sous excitation radiofréquence, l'amplitude du champ magnétique est codée sur l'intensité fluorescence du centre NV illuminé par un laser vert.  
(droite) Cartographie quantitative du champ magnétique produit par la modulation sinusoïdale de l'ordre antiferromagnétique dans un film de  $\text{BiFeO}_3$ , d'épaisseur 30 nm.

### En savoir plus

Real-space imaging of non-collinear antiferromagnetic order with a single spin magnetometer

I. Gross, W. Akhtar, V. Garcia, L. J. Martinez, S. Chouaieb, K. Garcia, C. Carrétéro, A. Barthélémy, P. Appel, P. Maletinsky, J.-V. Kim, J. Y. Chauleau, N. Jaouen, M. Viret, M. Bibes, S. Fusil et V. Jacques

*Nature* (2017), doi:10.1038/nature23656

### Contact chercheur

Vincent Jacques, chercheur CNRS

### Informations complémentaires

Laboratoire Charles Coulomb (L2C, CNRS/Univ. Montpellier)  
Unité mixte de physique CNRS/Thales (CNRS/Thales/UPSud/Univ. Paris Saclay)  
Centre de nanosciences et nanotechnologies (C2N, CNRS/UPSud/Univ. Paris Saclay)  
Service de physique de l'état condensé (SPEC, CNRS/CEA/Univ. Paris Saclay)  
Synchrotron SOLEIL (CNRS)

### Lumière sur les parois ferroélectriques

Octobre 2017

Pour la première fois, une équipe de chercheurs a observé que la paroi séparant deux domaines d'un matériau ferroélectrique présente une polarisation non nulle, contrairement à ce qu'il était admis jusque là. L'exploitation de la polarisation interne de ces parois ouvre des perspectives encourageantes pour l'accroissement des capacités de stockage des mémoires numériques.

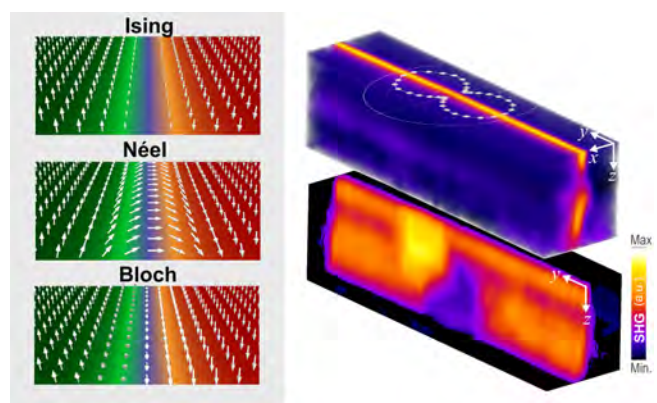
Les matériaux ferroélectriques sont constitués de régions microscopiques où la polarisation électrique est figée dans une même orientation. La frontière séparant deux domaines ferroélectriques de polarisation opposée était jusqu'à présent méconnue, notamment à cause de sa taille qui n'excède pas quelques dizaines de nanomètres. Des chercheurs de l'Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg sont toutefois parvenus à l'observer grâce à l'imagerie laser et à des simulations numériques.

Il était généralement admis que les parois ferroélectriques présentent une configuration de type Ising, autrement dit une polarisation interne nulle. Menée sur deux matériaux modèles, car ayant fait l'objet de récentes

études théoriques, cette exploration des parois a révélé qu'il n'en est rien. En effet, l'observation par microscopie laser a mis en évidence une émission optique non linéaire localisée sur les parois. L'analyse de cette réponse optique, et sa modélisation, a montré une déviation nette par rapport à celle que donnerait une polarisation nulle de type Ising. Et selon la symétrie du matériau étudié, il a été observé une polarisation parallèle ou perpendiculaire. Elle est donc non seulement non nulle, mais elle peut prendre plusieurs orientations. Ces parois ont été appelées parois de Néel, ou Bloch selon l'orientation de la polarisation, par analogie avec les parois observés dans les matériaux ferromagnétiques.

L'organisation en domaines de matériaux ferroélectriques permet d'ores et déjà le codage binaire de l'information dans les mémoires numériques. En offrant la possibilité d'exploiter en plus la polarisation interne des parois, cette étude contribue à la course vers l'accroissement de la capacité de stockage numérique. Elle permet aussi de franchir un pas supplémentaire dans l'observation des parois ferroélectriques en révélant leur structure en trois dimensions.

Les travaux présentés impliquent des chercheurs de l'Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg (IPCMS, CNRS/Univ. Strasbourg), de l'Université de Genève et du KTH Royal Institute of Technology de Stockholm. Ils sont publiés dans la revue *Nature Communications*.



La partie à gauche de l'image représente l'organisation de la polarisation (flèches) dans des parois séparant deux domaines opposés (couleurs rouge et verte). À droite, la configuration tridimensionnelle d'une paroi chirale révélée par imagerie optique non-linéaire dans un cristal photonique ferroélectrique. L'analyse de la lumière émise par cette paroi (plot polaire) révèle une polarisation préférentielle le long de la paroi, en accord avec une structure interne de type Bloch. © SaliaCherifi-Hertel, IPCMS (CNRS/Université de Strasbourg).

### En savoir plus

[Non-Ising and chiral ferroelectric domain walls revealed by nonlinear optical microscopy](#)

S. Cherifi-Hertel, H. Bulou, R. Hertel, G. Taupier, K. Dodzi (Honorat) Dorkenoo, C. Andreas, J. Guyonnet, I. Gaponenko, K. Gallo & P. Paruch

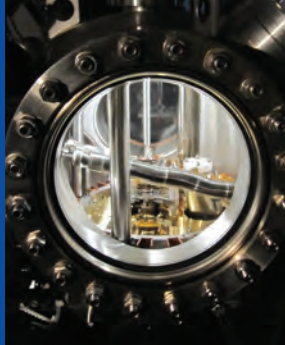
*Nature Communications* (2017), doi:10.1038/ncomms15768

### Contact chercheur

Salia Cherifi-Hertel, chargée de recherche au CNRS

### Informations complémentaires

Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg (IPCMS, CNRS/Univ. Strasbourg)



### Cartographier le temps de vie des charges électriques dans les cellules solaires grâce à la microscopie en champ proche

Juin 2017

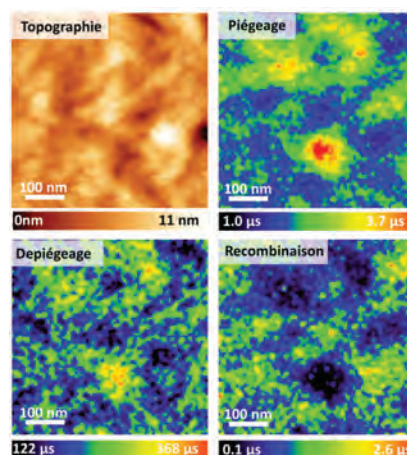
Des physiciens grenoblois viennent de mettre au point une nouvelle technique d'imagerie en champ proche permettant de cartographier le temps de vie des charges électriques dans les cellules solaires avec une résolution de quelques nanomètres. Ce développement instrumental sans équivalent permet d'identifier les défauts qui limitent le rendement des cellules solaires de troisième génération.

Dans la fabrication de cellules solaires organiques à base de polymères et de molécules, les chercheurs associent des matériaux donneur et accepteur d'électrons à l'échelle de la dizaine de nanomètres. L'énergie lumineuse est convertie en charges électriques de signes opposés (les électrons et les trous) aux interfaces entre le donneur et l'accepteur. Une cellule solaire performante parvient à restituer à l'utilisateur sous forme d'un courant électrique le maximum de ces charges ainsi créées en évitant les piègeages dans les défauts et les pertes par recombinaison, c'est-à-dire l'annihilation d'une charge avec un partenaire de signe opposé.

Depuis quelques années, quelques groupes internationaux ont développé des techniques d'imagerie basées sur le microscope à force atomique (AFM), avec l'ambition de comprendre comment les charges se déplacent et se recombinent dans les cellules solaires. Jusqu'à maintenant, il n'existait pas de microscope capable de réaliser des images de temps de vie des photo-porteurs. C'est le défi relevé avec succès par l'équipe du Laboratoire Systèmes moléculaires et nano-matériaux pour l'énergie et la santé (SyMMES, CNRS/Univ. Grenoble Alpes/CEA), en collaboration avec le LETI-Minatec (CEA). Pour cela, les chercheurs ont utilisé la microscopie dite à sonde de Kelvin (KPFM), un mode dérivé de l'AFM qui permet de réaliser une cartographie du potentiel électrique en surface des cellules solaires avec une résolution spatiale de quelques nanomètres. Ils ont également éclairé les cellules solaires avec des impulsions lumineuses de durée et cadence variables. Les chercheurs ont alors analysé la manière dont ce potentiel de surface évolue en fonction de la modulation lumineuse. En faisant varier la cadence, ils ont ainsi pu remonter pour la première fois au temps de vie des charges.

L'équipe des microscopistes a en fait démontré qu'il est possible de faire bien plus que mesurer le temps de vie des photo-porteurs. Cette nouvelle technique d'imagerie permet de produire des images reflétant le comportement des charges à différents temps caractéristiques. Il est ainsi possible de voir où les charges sont piégées, quel est le temps nécessaire pour s'échapper de ces pièges, et à quelle vitesse les charges s'annihilent par recombinaison avec un partenaire de signe opposé.

Ces chercheurs ont ainsi développé un outil universel très prometteur pour identifier les défauts dans les cellules solaires. La résolution temporelle n'est limitée que par les performances du dispositif d'illumination. Ainsi, il devrait être possible à l'avenir d'avoir accès à des dynamiques de plus en plus rapides en gardant une résolution spatiale nanométrique.



Images de la couche active d'une cellule solaire organique. L'image de la topographie de surface mesurée en AFM (en haut à gauche) ne permet pas de conclure quant à l'existence de défauts dans la couche organique. Les images du photo-potential résolues en temps révèlent l'existence de zones où les charges se piègent (et se de-piègent) plus ou moins vite. On peut aussi prendre des images montrant les variations du temps mis par les charges pour s'annihiler par recombinaison. © SyMMES (CNRS/Univ. Grenoble Alpes/CEA)

### En savoir plus

[Photo-carrier multi-dynamical imaging at the nanometer scale in organic and inorganic solar cells](#)

P. A. Fernández Garrillo, Ł. Borowik, F. Caffy, R. Demadrille et B. Grévin

*ACS Appl. Mater. Interfaces* (2016), doi:10.1021/acsami.6b11423

### Contact chercheur

Benjamin Grévin, chercheur CNRS

### Informations complémentaires

Laboratoire Systèmes moléculaires et nano-matériaux pour l'énergie et la santé (SyMMES, CNRS/Univ. Grenoble Alpes/CEA)



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Explorer la formation des nano-étoiles en or

Décembre 2017

L'observation de la croissance de nanoétoiles d'or au microscope électronique a permis de revoir complètement les mécanismes complexes qui président à leur formation.

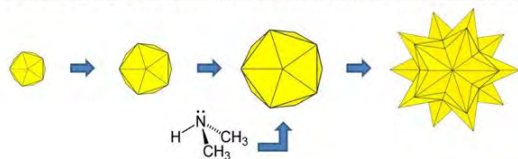
Les nanoétoiles (NEs) d'or, composées d'un corps central et de plusieurs bras pointus, sont parmi les formes les plus difficiles à synthétiser en solution, de manière reproductible. Or, elles possèdent des propriétés prometteuses pour des applications en imagerie biomédicale et en détection moléculaire. La stratégie de synthèse des NEs combine généralement l'utilisation de nanogermes en or de formes spécifiques pour orienter la croissance des bras, et de molécules organiques capables de stabiliser les surfaces à hauts indices de Miller (indices permettant de désigner les plans dans un cristal), normalement instables. Malgré tout, la synthèse de ces nanoparticules métalliques étoilées conduit trop souvent à des formes aléatoires, ce qui souligne la nécessité de mieux comprendre leurs mécanismes de formation à l'échelle atomique.

Une équipe du laboratoire Matériaux et phénomènes quantiques (MPQ, CNRS/Univ. Paris-Diderot) a exploité la microscopie électronique en transmission en milieu liquide afin d'étudier l'influence de la forme des germes et des molécules organiques sur les mécanismes atomiques qui dictent la forme des NEs. Grâce à cette approche *in situ* originale permettant de filmer la croissance d'objets nanométriques dans une solution liquide de composition contrôlé et modulable, ils ont démontré que la formation d'une NE est possible sur un germe icosaédrique *via* la

croissance de pyramides à base triangulaire sur chacune des faces du germe, composées de plans (111). Comme un icosaèdre possède 20 facettes triangulaires, des NEs avec 20 bras parfaitement symétriques peuvent ainsi se former si les germes initiaux ne sont pas déformés. De façon surprenante, alors qu'ils présentent aussi des facettes triangulaires terminées par des plans cristallins (111), les nanodécaèdres (10 faces) ne se transforment pas en NEs, ce qui suggère un possible effet de la contrainte cristalline, plus importante dans un germe décaédrique. Si la symétrie du germe impose la forme finale de la NE, cette transformation n'est possible qu'en présence d'agent de fonctionnalisation organique, autrement dit de molécules organiques venant se fixer sur certaines facettes.

En injectant des molécules de diméthylamine dans le milieu réactionnel au cours de la croissance, les chercheurs ont pu démontrer que contrairement aux idées reçues, cet agent organique ne stabilise pas une facette de haut indice donnée. Si c'était le cas, les bras grandiraient par couches successives, passant peu à peu d'une pyramide tronquée à une pyramide complète. Au contraire, les molécules de diméthylamine activent des mécanismes de diffusion extrêmement dynamiques des atomes à la surface des nanostructures. Ainsi, les bras « poussent » directement à partir du centre des facettes (111) du germe, comme si toute une pyramide jaillissait à partir d'un pyramidion que l'on tirerait vers le haut (cf. figure).

Publié dans la revue *Nanoletters*, ce travail démontre que la microscopie électronique *in situ* permet de porter un regard nouveau sur les mécanismes de croissance et sur les stratégies de synthèse des nanomatériaux en phase liquide.



Série d'images de microscopie électronique en milieu liquide montrant la transformation d'un germe icosaédrique en une nano-étoile avec 20 bras symétriques induit par l'injection de diméthylamine dans le milieu réactionnel. Chaque image fait 150 nm de côté et la série d'images est acquise sur 340 secondes.

## En savoir plus

Exploring the formation of symmetric gold nanostars by liquid-cell transmission electron microscopy electron microscopy

N. Ahmed, G. Wang, J. Nelayah, C. Ricolleau et D. Alloyeau

*Nanoletters* (2017), doi:10.1021/acs.nanolett.7b01013

## Contact chercheur

Damien Alloyeau, chargé de recherche CNRS

## Informations complémentaires

Laboratoire Matériaux et phénomènes quantiques (MPQ, CNRS/Univ. Paris-Diderot)



www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16  
T 01 44 96 42 53  
inp.com@cnrs.fr  
www.cnrs.fr/inp



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Le synchrotron mis à profit pour sonder les atomes actifs dans une jonction tunnel magnétique

Juillet 2017

**Des physiciens ont réussi une première mondiale en mesurant la conduction électrique d'une cellule mémoire magnétique en fonctionnement lorsque celle-ci est exposée au rayonnement synchrotron.**

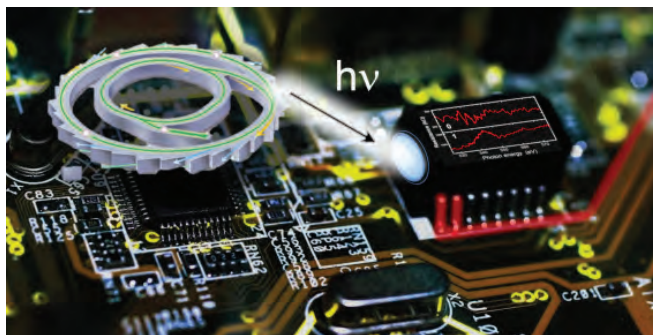
Grâce à la brillance du rayon synchrotron, la science des matériaux est aujourd'hui capable de réaliser une spectroscopie poussée de matériaux complexes. Cependant, une telle étude ne renseigne pas toujours de manière pertinente sur le fonctionnement de dispositifs façonnés à partir de ces matériaux. De plus, tester les performances d'un dispositif tandis que l'on explore un espace de paramètres en science des matériaux potentiellement très vaste représente une méthodologie de recherche longue, qui présume un lien de causalité entre la modification de propriétés de matériaux et la performance du dispositif.

C'est un changement de paradigme concernant ce lien de causalité qu'ont proposé les physiciens des laboratoires IPCMS (Strasbourg), Institut Jean Lamour (Nancy) et du synchrotron SOLEIL, en réalisant l'exploit de sonder, en fonctionnement, une mémoire magnétique à accès aléatoire (STT-MRAM). Celle-ci constitue une des briques élémentaires des ordinateurs de prochaine génération. Pour cela, ils ont irradié à l'aide de l'émission de rayons X provenant du synchrotron une cellule mémoire magnétique en fonctionnement tout en mesurant la conduction électrique à travers la jonction. Cette combinaison de mesures inédites et *in operando* a permis, à l'échelle de la liaison Fer/Oxygène, de faire la lumière sur l'impact qu'ont les inhomogénéités de courant et les interfaces sur le transport tunnel polarisé en spin. Ces travaux représentent un cas extrême : celui de sonder les propriétés d'un nombre très restreint d'atomes qui régissent l'opération et la performance d'un dispositif à l'état solide. En effet, la spectroscopie

d'absorption de rayons X avec la brillance d'un rayonnement synchrotron permet d'étudier les propriétés électroniques d'espèces atomiques précises diluées au sein d'une hétérostructure. Séparément, les défauts structurels au sein de la barrière diélectrique d'une jonction tunnel magnétique canalisent, à l'échelle nanoscopique, le transport et ainsi la performance de ce dispositif. Selon une technique *operando* conventionnelle, après avoir opéré le dispositif, celui-ci est éteint et l'on sonde alors les propriétés de tous les atomes du dispositif. L'étude publiée dans *Advanced Materials* décrit une nouvelle technique *operando* dans laquelle la caractérisation s'effectue en étudiant le courant qui traverse le dispositif. Ceci focalise la technique de caractérisation sur les seuls atomes qui contribuent à l'opération et à la performance du dispositif, ce qui accélère le développement de dispositifs comprenant des matériaux novateurs, tant bien aux échelles académique qu'industrielle.

Une première difficulté majeure fut la mise en place d'un environnement de mesures électriques adéquat au synchrotron SOLEIL afin de mesurer ces dispositifs électrostatiquement fragiles en s'affranchissant des interférences électromagnétiques environnantes. La difficulté expérimentale principale fut ensuite d'isoler, au sein du courant traversant le dispositif, l'impact de l'absorption des photons X sur le transport tunnel impliquant les atomes d'oxygène de la barrière tunnel de MgO. En effet, ce rayonnement X induit sur ce dispositif un photocourant dont il faut s'affranchir.

Ces résultats ouvrent de nombreuses perspectives, aussi bien pour mener des études fondamentales que des études à visées plus appliquées (cellules solaires, transistors MOS, stockage de l'énergie). Les grands instruments de recherche tels que les synchrotrons pourraient ainsi permettre aux industriels de mieux comprendre le fonctionnement de leurs dispositifs et accélérer leur processus de recherche et développement. Cette démonstration est d'autant plus pertinente pour les acteurs industriels qu'elle a été réalisée sur une classe de dispositifs qui est déjà commercialisée pour lire et écrire le contenu des cellules mémoires magnétiques.



Vue artistique de l'expérience réalisée : un faisceau de lumière issu du rayonnement synchrotron est focalisé sur une cellule mémoire en fonctionnement. © Daniel Lacour/CNRS

### En savoir plus

#### Probing a device's active atoms

M. Studniarek, U. Halisdemir, F. Schleicher, B. Taudul, E. Urbain, M. Hervé, C.H. Lambert, A. Hamadeh, S. Petit-Watelot, O. Zill, D. Lacour, S. Boukari, L. Joly, F. Scheurer, G. Schmerber, V. Da Costa, A. Dixit, P.A. Guitard, M. Acosta, F. Leduc, F. Choueikani, E. Otero, W. Wulfhekel, F. Montaigne, E. Nahuel Montebianco, J. Arabski, P. Ohresser, E. Beaurepaire, W. Weber, M. Alouani, M. Hehn, M. Bowen  
*Advanced Material* (2017), doi:10.1002/adma.201606578

### Contact chercheur

Martin Bowen, chargé de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Service de physique de l'état condensé (SPEC, CNRS/CEA)

Synchrotron SOLEIL (CNRS/CEA)

Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg (IPCMS, CNRS/Univ. Strasbourg)

cnrs

www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp

Illustration du bandeau : © Emmanuel Perrin/CNRS Photothèque



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Suivre la dynamique ultrarapide d'état magnétique grâce à un laser à rayons X

Novembre 2017

Pour la première fois, un consortium international est parvenu à suivre en temps réel à l'échelle de la femtoseconde, la réorganisation structurale d'un complexe métallique durant une transition magnétique photo-induite. Cela a été permis par le développement de sources de rayons X intenses et cohérentes aux temps courts.

Lors de la transformation chimique photo-induite dans une molécule, l'excitation des électrons et la réorganisation structurale de la molécule sont intimement couplées. Pour suivre la dynamique d'excitation et comprendre ces couplages, il est important de pouvoir suivre en temps réel cette évolution. Pour y parvenir, les physiciens et les chimistes utilisent une technique maintenant bien maîtrisée dite pompe-sonde : un premier flash laser, la pompe, excite l'échantillon et induit une dynamique au sein de la molécule un second flash laser, la sonde, vient « lire » l'état du matériau. L'expérience est répétée en faisant varier le délai entre les deux flashes permettant de reconstruire le déroulement de la transformation à l'échelle de la femtoseconde ( $10^{-15}$  s), voire moins.

Pour avoir accès non seulement à la dynamique électronique mais à la dynamique structurale, il est nécessaire d'opérer la « lecture » dans le domaine des rayons X en utilisant des techniques de spectroscopie type XANES, c'est-à-dire de spectroscopie d'absorption des rayons X. Afin de garder une résolution temporelle et de pouvoir appliquer la technique pompe-sonde, il est nécessaire d'utiliser une source de rayons X émettant des flashes lumineux cohérents. Or, très peu de sources existent aujourd'hui

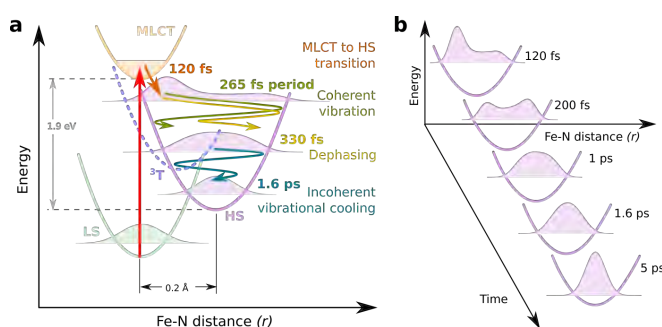
dans le monde et leur utilisation reste d'une grande complexité.

Un consortium international associant deux équipes françaises, l'une de l'IPR à Rennes et l'autre de l'ICMBC à Bordeaux, est parvenu à réaliser une expérience pompe-sonde avec une telle source laser et d'effectuer le suivi de l'évolution structurale et électronique d'un complexe métallique durant une transition magnétique photo-induite. Ces travaux sont publiés dans la revue *Nature communications*.

La source laser, le laser X-FEL (X-ray Free Electron Laser), est une machine de nouvelle génération de 2 km de long permettant d'obtenir des flash lumineux d'une vingtaine de femtoseconde dans la gamme des 7000 eV avec une intensité lumineuse suffisante pour permettre la spectroscopie d'absorption. Ce laser à électron libre est situé au SLAC à Stanford.

En utilisant ce laser dans une technique pompe-sonde, les chercheurs ont pu observer pour la première fois la dynamique photo-induite des états magnétiques d'un complexe métallique à base de fer. Le suivi pas à pas de la dynamique interne de la molécule révèle que c'est la réorganisation structurale, induite par l'excitation, qui permet de générer le nouvel état magnétique. Ils ont confronté des modèles théoriques aux résultats expérimentaux et démontré que cette dynamique structurale se faisait en plusieurs étapes passant entre autre par des états de transfert de charge. Ce schéma en plusieurs étapes, permet d'affiner les différents processus de ce phénomène de dynamique magnétique photo-induit.

Ces résultats et, parallèlement, le développement de sources flash cohérent et intense de rayons X aux propriétés exceptionnelles, ouvrent des perspectives importantes pour la compréhension de nombreux phénomènes chimiques ou physiques photo-induits aux échelles de temps courts.



Représentation schématique du piégeage structural observé avec l'absorption X résolu en temps © Henrik Lemke (PS) et Marco Cammarata (CNRS)

## En savoir plus

### Coherent structural trapping through wave packet dispersion during photoinduced spin state switching

H. Lemke, K. S. Kjaer, R. Hartsock, T. B. van Driel, M. Chollet, J. M. Glowina, S. Song, D. Zhu, E. Pace, S. F. Matar, M. M. Nielsen, M. Benfatto, K. J. Gaffney, E. Collet et M. Cammarata

*Nature Communications* (2017), doi:10.1038/ncomms15342

Lire l'article sur la base d'archives ouvertes HAL

## Contact chercheur

Marco Cammarata, chercheur CNRS

## Informations complémentaires

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



www.cnrs.fr

### Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16  
T 01 44 96 42 53  
inp.com@cnrs.fr  
www.cnrs.fr/inp



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Record de froid pour les électrons d'un circuit électrique de taille micrométrique

Mars 2017

Des physiciens ont refroidi des électrons au sein de circuits électriques micrométriques à une température de 6 millikelvins. Cette performance a été rendue possible par l'utilisation d'un dispositif de mesure de température *in situ* combinant trois techniques différentes.

Etudier le comportement des circuits électriques à très basse température présente une difficulté bien particulière. Même si l'on maintient toute la matière du circuit à une température inférieure au millikelvin, le réchauffement dû à la présence de connexions entre ce circuit et les instruments de mesure extérieurs interdit généralement à la température des électrons de descendre en-dessous d'une dizaine de millikelvins. Puisque les électrons peuvent être plus chauds que leur environnement, il est nécessaire de mesurer directement leur température. Des approches de mesures *in situ* de la température des électrons ont été proposées, mais la question de la validité des techniques mises en oeuvre et surtout de leur calibration reste ouverte.

Des physiciens du Centre de nanosciences et nanotechnologies (C2N, CNRS/Univ. Paris-Sud/Univ. Paris Saclay) se sont affranchis de ce problème en combinant sur un même échantillon trois techniques de mesure *in situ* implantées dans une nanostructure à deux dimensions. Comme ces trois méthodes reposent sur des principes physiques différents, leur combinaison a permis aux auteurs de mesurer une température électronique de 6 millikelvins dans leur circuit, température la plus basse jamais atteinte pour les électrons se propageant dans des circuits micrométriques ou nanométriques. Ce travail est publié dans la revue *Nature Communications*.

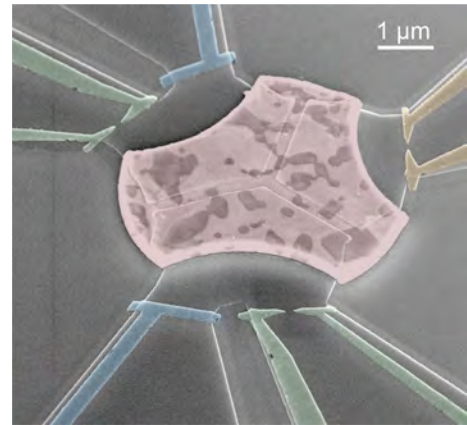


Image au microscope électronique à balayage colorisée du circuit mesuré  
© Frédéric Pierre (C2N, CNRS/UPSud/Univ. Paris Saclay)

De telles avancées vers de plus basses températures électroniques sont d'abord directement pertinentes pour l'exploration fondamentale des phénomènes quantiques et le développement de nouvelles technologies quantiques. Le concept de température imprègne les lois de la physique, de sorte qu'établir précisément la thermométrie s'avère essentiel pour la compréhension quantitative des phénomènes quantiques. Enfin, soulignons que l'approche développée et démontrée dans ce travail ouvre la voie à de nouveaux progrès dans le refroidissement des électrons vers des températures encore plus basses.



Photo du « réfrigérateur à dilution », le dispositif expérimental dans lequel a été installé et mesuré le circuit micrométrique. © Frédéric Pierre (C2N, CNRS/UPSud/Univ. Paris Saclay)

### En savoir plus

[Primary thermometry triad at 6 mK in mesoscopic circuits](#)

Z. Iftikhar, A. Anthore, S. Jezouin, F. D. Parmentier, Y. Jin, A. Cavanna, A. Ouerghi, U. Gennser et F. Pierre

*Nature Communications* (2016), doi:10.1038/ncomms12908

### Contact chercheur

Frédéric Pierre, directeur de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Centre de Nanosciences et de Nanotechnologies (C2N, CNRS/Univ. Paris-Sud/Univ. Paris Saclay)

cnrs

www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16  
T 01 44 96 42 53  
inp.com@cnrs.fr  
www.cnrs.fr/inp



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Un nouveau mécanisme de refroidissement ultraefficace pour les transistors de graphène

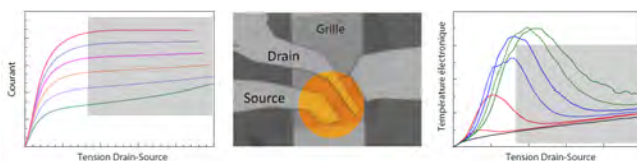
Décembre 2017

Des physiciens viennent de mettre en évidence un nouveau mécanisme de refroidissement pour les composants électroniques en graphène déposés sur du nitrure de bore. L'efficacité de ce mécanisme leur a permis d'atteindre pour la première fois des intensités électriques à la limite intrinsèque de conduction du graphène.

Du supercalculateur au smartphone, les concepteurs de matériel informatique sont confrontés à un défi majeur : évacuer toujours plus de chaleur pour éviter la dégradation voire même la destruction des composants électroniques. La physique est impitoyable : en augmentant la densité de composants sur une puce vous augmentez nécessairement la dissipation d'énergie et donc l'échauffement. Aujourd'hui, avec les matériaux lamellaires de la famille du graphène, cette question devient particulièrement aiguë, car les composants ne sont constitués que d'une seule couche d'atomes. Dans ce contexte, en réalisant un transistor à base de graphène déposé sur un substrat de nitrure de bore, des physiciens du Laboratoire Pierre Aigrain (CNRS/ENS/UPMC/Univ. Paris Diderot) ont mis à jour un nouveau mécanisme de refroidissement 10 fois plus efficace que la simple diffusion de la chaleur. Ce nouveau mécanisme, qui exploite la nature bidimensionnelle des matériaux ouvre un véritable « pont thermique » entre le graphène et le substrat. Les chercheurs ont démontré l'efficacité de ce mécanisme en faisant circuler dans le graphène des niveaux de courant électrique encore inexplorés, à la limite intrinsèque du matériau et cela sans aucune dégradation du dispositif. Ce résultat, publié dans *Nature Nanotechnology*, constitue un pas important vers le développement de transistors électroniques haute-

fréquence à base de graphène.

Pour réaliser cette expérience, les physiciens ont tout d'abord fabriqué un transistor à base de graphène. À cet effet, ils ont déposé le graphène sur un large cristal de nitrure de bore de quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur lui-même déposé sur une plaque en or servant de thermostat. Ils ont alors fait fonctionner ce transistor à des intensités électriques croissantes et mesuré à la fois la température des électrons et celle du cristal. La température des électrons a été déduite de la mesure des fluctuations haute fréquence du courant électrique. La température du cristal de nitrure de bore a été mesurée par spectroscopie Raman. Leur première surprise a été d'observer que seuls les électrons s'échauffent, épargnant ainsi la structure cristalline du matériau. Les chercheurs ont ensuite observé l'allumage d'un mécanisme de refroidissement des électrons ultra-efficace au-delà d'un seuil de tension. Ils ont expliqué ce phénomène par l'anisotropie diélectrique de la couche de nitrure de bore. Cette anisotropie confère à cet isolant la propriété remarquable de posséder des modes mixtes lumière-vibration appelés polaritons hyperboliques qui se propagent dans l'épaisseur du matériau dans un régime interdit à la plupart des autres isolants. Ces modes « hyperboliques » ouvrent un véritable pont thermique entre le graphène et l'électrode arrière garantissant un refroidissement dix fois plus efficace que la simple diffusion de la chaleur. L'équipe du LPA a montré que l'efficacité de ce mécanisme est découplée lorsque le transistor entre dans le régime de Zener-Klein, obtenu sous très fort champ électrique dans du graphène de haute mobilité électronique. Dans ce nouveau régime, d'intérêt tout particulier pour des applications d'amplification à haute fréquence, les électrons sont directement pompés de la bande de valence à la bande de conduction par effet tunnel. Dans ces conditions, ils se couplent de manière optimale aux modes hyperboliques, permettant à la chaleur de passer directement au substrat sans endommager le réseau du graphène.



Caractéristiques courant-tension (gauche) et température-tension (droite) d'un transistor graphène sur nitrure de bore. L'effet transistor est visible par la modulation du courant en fonction de la tension grille en régime de transport tunnel Zener-Klein (grisé). Il s'accompagne d'une chute remarquable de la température électronique liée à l'émission de polaritons hyperboliques dans le nitrure de bore.

## En savoir plus

[A graphene Zener-Klein transistor cooled by a hyperbolic substrate](#)

W. Yang, S. Berthou, X. Lu, Q. Wilmart, A. Denis, M. Rosticher, T. Taniguchi, K. Watanabe, G. Fève, J.-M. Berroir, G. Zhang, C. Voisin, E. Baudin & B. Plaçais

*Nature Nanotechnology* (2017), doi:10.1038/s41565-017-0007-9

## Contact chercheur

Bernard Plaçais, directeur de recherche CNRS

## Informations complémentaires

Laboratoire Pierre Aigrain (LPA, CNRS/ENS/UPMC/Univ. Paris Diderot)

cnrs

www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp

Illustration du bandeau : © Emmanuel Perrin/CNRS Photothèque





### Un gaz de molécules ultra-froides avec un moment dipolaire record

Janvier 2017

Des physiciens viennent d'obtenir pour la première fois un gaz ultra-froid de molécules en faisant réagir du sodium avec du rubidium. C'est le calcul théorique de la position des niveaux d'énergie de la molécule obtenue, NaRb, qui a permis de déterminer le schéma laser optimal pour cette synthèse.

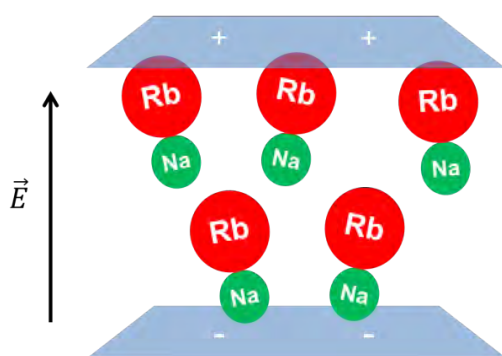
Les chercheurs savent aujourd'hui créer des gaz ultra-froids de molécules en combinant des atomes d'espèces différentes provenant de deux nuages d'atomes froids. L'organisation des molécules au sein d'un tel gaz est gouvernée par les effets quantiques et, en premier lieu, par une interaction à longue distance : l'interaction dipôle-dipôle<sup>1</sup>. Un réseau optique à trois dimensions dans lequel de telles molécules seraient piégées et dont les dipôles seraient alignés le long d'un champ électrique représenterait un environnement idéal pour des expériences de simulation quantique. Pour cela, les chercheurs doivent concilier deux impératifs. Trouver quelles molécules sont susceptibles d'interagir le plus fortement possible et, pour celles-ci, déterminer les fréquences des lasers qui seront utilisés pour conduire efficacement ces molécules dans leur état fondamental stable une fois que les atomes sont associés. Tout ceci nécessite une connaissance très fine des états de la molécule et des transitions accessibles par laser. Plusieurs couples d'atomes de la famille « sodium (Na), potassium (K), rubidium (Rb), césium (Cs) » sont dans la course : NaK, KRb, RbCs ou NaRb. Ce dernier a été choisi par la collaboration entre une équipe de théoriciens du Laboratoire Aimé Cotton (LAC, CNRS/UPSud/Univ. Paris Saclay/ENS Paris-Saclay) et une équipe expérimentale de l'Université chinoise de Hong Kong (CUHK).

Une modélisation numérique fine des niveaux d'énergie de la molécule NaRb par l'équipe théorique THEOMOL du LAC a permis de proposer un schéma qui maximise la création de molécules dans leur état fondamental grâce au dispositif expérimental de l'équipe de CUHK. Les chercheurs ont ainsi obtenu un gaz ultra-

froid de molécules NaRb avec un moment dipolaire record de 1 Debye, soit deux fois plus grand que les expériences précédentes, à une température de l'ordre de 700 nanokelvins. C'est aujourd'hui le gaz ultra-froid de molécules avec le moment dipolaire le plus élevé, ce qui est crucial pour la détection des effets des interactions dipôle-dipôle. Leur expérience a en outre mis en évidence un obstacle inattendu : malgré leur stabilité chimique prévue, un processus encore inexpliqué conduit à une perte importante de molécules à l'état fondamental. Parmi les hypothèses explorées figure la formation transitoire de complexes (NaRb)<sub>2</sub> qui s'échapperaient spontanément de la zone de piégeage. De telles observations sont précieuses pour l'ensemble des groupes travaillant dans le domaine car elles permettent d'approfondir les processus de formation et de stabilité de ces gaz ultra-froids. Ce travail est paru dans *Physical Review Letters*.

La méthode expérimentale utilisée par la collaboration comporte trois étapes majeures : la création simultanée de deux nuages d'atomes ultra-froids de Na et Rb piégés par un champ laser au même endroit ; l'association de paires d'atomes en molécules dans un même niveau très faiblement lié, contrôlée par un champ magnétique ajustable ; le transfert – dit adiabatique – de la population de ce niveau vers le niveau fondamental absolu des molécules NaRb par une séquence de deux impulsions lasers synchronisées pour optimiser son efficacité. Le choix des paramètres de ces lasers est critique et ne peut être déterminé que par une connaissance très détaillée de la structure des niveaux d'énergie moléculaires. La simplicité de la molécule NaRb – et des molécules de la même famille – n'est qu'apparente, et cela reste un défi pour les méthodes avancées de calcul de structure électronique, auxquelles doivent être adjointes des techniques de spectroscopie moléculaire. C'est ce qui fait l'originalité de cette collaboration internationale.

<sup>1</sup> Un gaz ultra-froid constitue un système aux propriétés extrêmes : sa densité est un million de fois plus faible que celle de l'atmosphère terrestre, sa température avoisine le zéro absolu à quelques dizaines de nanokelvins, et les particules qui le composent interagissent à des distances mille fois plus grande que leur taille. En présence d'un champ électrique, des molécules formées de deux atomes alcalins différents acquièrent un moment dipolaire électrique suffisamment fort pour que la dynamique du gaz ultra-froid soit dominée par l'interaction électrostatique entre les dipôles électriques de ces molécules : une interaction à grande distance, contrôlable par le champ.



Un moment dipolaire permanent de 1 Debye a été mesuré par des techniques de spectroscopie sous champ électrique. Ainsi, les chercheurs ont obtenu par une collaboration théorie-expérience un gaz ultra-froid de NaRb : la molécule ultra-froide la plus dipolaire jusqu'à présent. © Equipe Théomol, Laboratoire Aimé Cotton

### En savoir plus

Creation of an Ultracold Gas of Ground-State Dipolar NaRb Molecules

Mingyang Guo, Bing Zhu, Bo Lu, Xin Ye, Fudong Wang, Romain Vexiau, Nadia Bouloufa-Maafa, Goulven Quéméner, Olivier Dulieu et Dajun Wang

*Physical Review Letters* (2016), doi:10.1103/PhysRevLett.116.205303

### Contacts chercheurs

Romain Vexiau, chargé de recherche CNRS

Goulven Quéméner, chargé de recherche CNRS

Nadia Bouloufa-Maafa, maître de conférences

Olivier Dulieu, directeur de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Laboratoire Aimé Cotton (LAC, CNRS/UPSud/Univ. Paris Saclay/ENS Paris-Saclay)



# Institut de physique

Communiqués de presse

## Un capteur de rayons X miniature pour une médecine de haute précision

mars 2017

Détecter des rayons X à une très petite échelle spatiale ouvre la voie à des images médicales et des thérapies de haute précision. C'est ce qu'ont réalisé des chercheurs du CNRS, de l'université de Franche-Comté et d'Aix-Marseille université, en intégrant un détecteur à l'extrémité d'une fibre optique. Ces résultats ont été publiés le 28 mars 2017 dans la revue *Optics Letters*.

Le rayonnement X permet de scruter la matière, que ce soit pour des applications médicales ou pour contrôler des pièces industrielles. Mais les détecteurs de rayons X sont encombrants, ce qui limite leur usage médical, spécialement pour des endoscopies. Les scientifiques cherchent donc à les miniaturiser, ce qui est loin d'être évident. En effet, la détection est indirecte : les rayons X sont d'abord absorbés par un matériau luminescent (un scintillateur), qui lui-même émet alors des photons de lumière visible, détectés par une caméra ou un photodétecteur. Or, à petite échelle, un scintillateur n'émet que très peu de photons, et dans toutes les directions : difficile pour une caméra de détecter le faible flux qui parvient jusqu'à elle !

Des chercheurs ont pourtant trouvé une solution, fondée sur l'utilisation d'une antenne optique qui redirige et canalise les photons émis par un scintillateur miniature. Ce dispositif ultra-compact rend possible la détection de rayonnements X dans des volumes de seulement quelques micromètres cubes. Inventé par une équipe du laboratoire Femto-ST (CNRS/Université de Franche-Comté/UTBM/ENSMM) en collaboration avec des chercheurs du CiNaM (CNRS/AMU) et de l'Institut Utinam (CNRS/Université de Franche-Comté), il est construit sur une fibre optique de quelques dizaines de micromètres de diamètre. A une extrémité de la fibre, les chercheurs ont fait croître une micro pointe de polymère. Par-dessus cette structure, ils ont greffé un fragment minuscule de scintillateur, puis ont recouvert le tout d'une fine couche de métal afin de finaliser l'antenne optique dont le rôle est de canaliser la lumière, comme le font les antennes cornets pour les micro-ondes. Quand le fragment de scintillateur reçoit des rayons X, il émet alors de la lumière que l'antenne redirige vers la fibre. Il ne reste plus qu'à placer un détecteur de lumière à l'autre extrémité de la fibre. L'idée était d'aboutir à un dispositif industrialisable : la réalisation de l'antenne optique sur la fibre par photo polymérisation, tout comme le greffage du scintillateur, sont des procédés qui permettraient de produire en série et à bas coût.

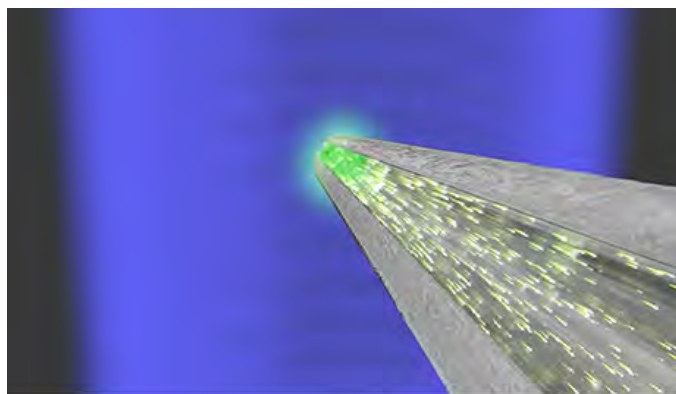
La démonstration a été effectuée avec des rayons X de basse énergie (10keV). Pour envisager des applications médicales, l'équipe veut maintenant passer le cap des hautes énergies : quelques dizaines de keV pour la radioscopie, et plusieurs centaines de keV pour des applications thérapeutiques. A plus long terme, les chercheurs ont d'autres idées. Ainsi, les antennes optiques pourraient permettre de réduire le délai entre l'absorption des rayons X et l'émission de lumière par le scintillateur, et déboucher sur des détecteurs de rayons X beaucoup plus rapides. Par ailleurs, alors que sa résolution

spatiale est aujourd'hui de l'ordre du micromètre, de nouvelles procédures permettraient de descendre jusqu'à 100 nanomètres.

Une perspective serait d'utiliser le détecteur comme une sonde de microscopie à balayage, pour analyser localement par exemple la composition chimique de matériaux composites.

Centre interdisciplinaire de nanoscience de Marseille

Contact chercheur : Thierry Grosjean, [thierry.grosjean@univ-fcomte.fr](mailto:thierry.grosjean@univ-fcomte.fr)



@ Miguel Angel Suárez, FEMTO-ST (CNRS/Université de Franche-Comté/UTBM/ENSMM).

Antenne optique couplée à un agrégat de scintillateurs placé à l'extrémité d'une fibre optique. Le rayonnement bleu représente les rayons X, la sphère verte intense et brillante correspond au fragment de scintillateur et les étincelles à l'intérieur du corps de l'antenne optique symbolisent l'émission de photons par l'agrégat luminescent sous l'effet des rayons X. Grâce à l'antenne optique, cette émission de lumière est fortement dirigée vers une fibre optique monomode très étroite.

## Cinéma moléculaire ultra-rapide : voir les protéines absorber la lumière

septembre 2017

Grâce à un procédé inédit, des scientifiques ont pu filmer les processus ultra-rapides à l'œuvre dans les protéines fluorescentes, largement utilisées comme marqueur en imagerie du vivant. Ce nouveau procédé, qui utilise des lasers gigantesques aux rayons X, permet d'étudier les processus tels que la vision, la bioluminescence et d'autres jusqu'ici inobservables. Ces travaux sont publiés dans *Nature Chemistry* le 11 septembre 2017 par une collaboration internationale impliquant les scientifiques du CEA, du CNRS, de l'Université Grenoble-Alpes, de Lille, de Rennes et Paris-Sud, ainsi que l'Institut Max-Planck de Heidelberg en Allemagne. [...]

Institut de physique de Rennes Contact chercheur : Marco Cammarata, [marco.cammarata@univ-rennes1.fr](mailto:marco.cammarata@univ-rennes1.fr)

THÉMATIQUES



SPATIAL - ASTRONOMIE



SONDER LA MATIÈRE



ÉCHELLE NANO & PARTICULES UNIQUES



TRANSITIONS DE PHASE & ORDRE ET DÉSORDRE



GRAINS, FLUIDES ET SOLIDES



PHYSIQUE ET VIVANT



INNOVATION



INTERFACE



### La synchronisation de nano-oscillateurs spintroniques à courte et longue portée

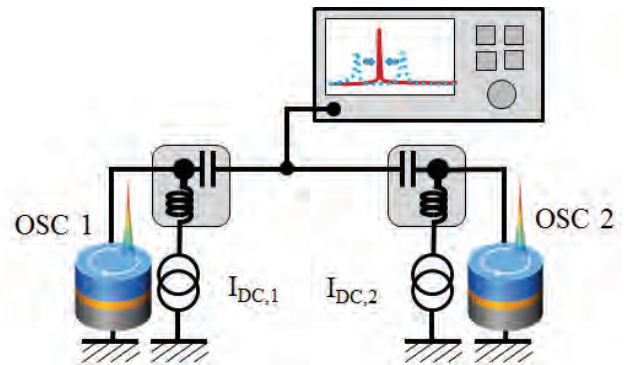
Juin 2017

Pour la première fois, des physiciens ont réussi à synchroniser deux nano-oscillateurs à transfert de spin par l'intermédiaire des courants radiofréquences émis par chacun d'entre eux et à contrôler leur rythme commun d'oscillation.

Ces nano-oscillateurs à transfert de spin sont des oscillateurs micro-onde de taille nanométrique présentant de très nombreux avantages : une plage d'opération en fréquence très large, des vitesses de modulation ultrarapides, et des procédés de fabrication compatibles avec la technologie CMOS. Dans la dernière décennie, de nombreuses études ont mis en évidence les atouts de ces nano-oscillateurs pour le développement d'une nouvelle génération de dispositifs radiofréquences tels que des sources micro-ondes ultra-compactes ou encore des détecteurs de fréquence ultra-rapides. Beaucoup plus récemment, ces nano-oscillateurs ont été envisagés pour le développement de mémoires associatives bio-inspirées dans lesquelles ces oscillateurs joueraient le rôle des neurones artificiels. Dans cette perspective, il est crucial de comprendre et maîtriser l'interaction à courte et longue distance de ces nano-oscillateurs pour les faire interagir en réseaux, tout comme les neurones interagissent dans le cerveau humain par exemple.

Dans cette étude, des physiciens de l'Unité mixte de physique CNRS/Thales à Palaiseau et du National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) à Tsukuba au Japon ont mis en évidence que les tensions générées par chacun des oscillateurs (inférieures au microvolt) étaient suffisantes pour le faire interagir avec ses proches ou lointains voisins (du nanomètre au mètre) auquel il était jusqu'à maintenant insensible. Leur rythme et leurs propriétés d'oscillation sont accordables à l'échelle du nanomètre grâce aux effets de transferts de spin et à plus longue distance de manière électrique en utilisant une ligne à retard. Une perspective à moyen ou long terme sera de contrôler ce couplage entre oscillateurs grâce à des synapses artificielles appelées des memristors.

Ces résultats publiés dans la revue *Nature Communications* ouvrent le champ de la nanoélectronique à celui de la physique non-linéaire de réseaux d'oscillateurs en interaction et à ses champs applicatifs attendus dans le domaine des dispositifs radiofréquences et du bio-inspiré.



*Schéma de principe de la synchronisation électrique de deux nano-oscillateurs vortex à transfert de spin : les oscillations d'aimantation de chaque oscillateur (ici des vortex magnétiques) génèrent deux courants radiofréquences par un phénomène magnéto-résistif. Ces courants se propagent électriquement entre les deux oscillateurs et induisent une interaction mutuelle appelée synchronisation. Les deux oscillateurs oscillent alors en phase et génèrent alors un seul et même courant hyperfréquence de plus grande amplitude et plus cohérent. © R. Lebrun et J. Grollier, Unité mixte de physique CNRS, Thales, Univ. Paris-Sud, Univ. Paris Saclay*

### En savoir plus

Mutual synchronization of spin torque nano-oscillators through a long-range and tunable electrical coupling scheme

R. Lebrun, S. Tsunegi, P. Bortolotti, H. Kubota, A.S. Jenkins, M. Romera, K. Yakushiji, A. Fukushima, J. Grollier, S. Yuasa et V. Cros

*Nature Communications* (2017), doi: 10.1038/ncomms15825

### Contact chercheur

Vincent Cros, directeur de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Unité mixte de physique CNRS, Thales, Univ. Paris-Sud, Univ. Paris Saclay



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Connexion optique de plusieurs systèmes nano-optomécaniques distants

Juin 2017

Pour la première fois, des physiciens ont couplé des nano-oscillateurs optomécaniques distants *via* un guide d'onde optique. Ce couplage leur a permis d'observer le verrouillage des oscillateurs sur une fréquence commune d'oscillation.

La lumière injectée dans un résonateur optomécanique peut provoquer l'apparition d'oscillations spontanées. La pression mécanique exercée par la lumière sur les parois du résonateur optique qui la confine déforme ce dernier et induit des vibrations acoustiques qui agissent en retour sur l'intensité de la lumière : au-delà d'un seuil, le résonateur devient un oscillateur optomécanique. Après quelques années d'existence dans les laboratoires, ces systèmes sont à présent bien développés. L'enjeu est aujourd'hui de réaliser des architectures collectives constituées de multiples oscillateurs connectés par des liens optiques, afin de développer des simulateurs optiques/mécaniques et des structures topologiques pour la lumière et les vibrations. Jusqu'à présent, le couplage n'avait été réalisé qu'entre deux oscillateurs très proches l'un de l'autre, par l'intermédiaire des effets de champ proche. Pour la première fois, des chercheurs du laboratoire Matériaux et phénomènes quantiques (MPQ, CNRS/Université Paris Diderot) ont couplé trois oscillateurs nano-optomécaniques distants par l'intermédiaire de la lumière se propageant dans un guide d'onde, ouvrant ainsi la porte à la réalisation d'architectures collectives nano-optomécaniques. La signature de ce couplage a été le verrouillage en phase de ces trois oscillateurs. Ces résultats sont publiés dans la revue *Physical Review Letters*.

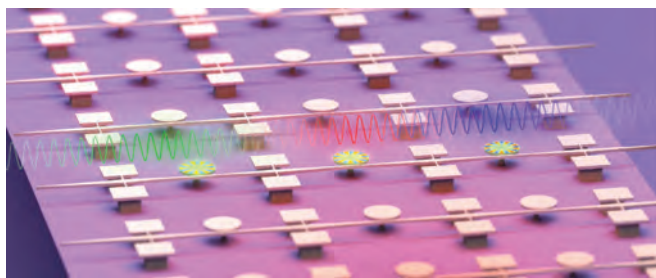


Illustration d'une cascade optomécanique constituée de trois résonateurs en disque, placés le long d'un même guide optique dans lequel la lumière se propage unidirectionnellement. Chaque résonateur possède un mode de galerie optique, et vibre sur un mode de respiration radiale. La cascade est pompée optiquement depuis la gauche. La lumière est injectée dans le premier disque et interagit avec son mouvement mécanique. Le signal optique en sortie du premier disque se propage jusqu'au second résonateur, où une interaction similaire se produit. Le signal optique en sortie du second disque se propage finalement jusqu'au troisième. © Christophe Baker/Ivan Favero/MPQ (CNRS/Université Paris Diderot)

Les nanorésonateurs ainsi que les guides optiques les reliant ont été réalisés en arséniure de gallium par gravure d'une galette constituée d'une hétérostructure d'arséniure de gallium et d'arséniure de gallium aluminium. Les résonateurs sont des disques de l'ordre de 3 micromètres de diamètre et de 320 nanomètres d'épaisseur reposant sur des tiges de 1,7 micromètre de haut et 300 nanomètres de diamètre. Les disques sont séparés d'environ 25 micromètres, tandis que des guides d'ondes relient deux ou trois de ces résonateurs. La lumière infrarouge injectée tangentiellement dans ces disques est confinée à leur périphérie dans un mode optique de galerie. Ce mode optique est couplé mécaniquement au mode acoustique de respiration par lequel le disque se dilate et se contracte radialement à une fréquence dans la gamme du gigahertz. L'une des difficultés majeures dans la réalisation de ce système est de fabriquer des ensembles de résonateurs dont les résonances optiques sont à la même fréquence, afin de pouvoir injecter de la lumière laser monochromatique dans tous les résonateurs à la fois. Pour cela, les chercheurs ont utilisé une technique d'accordage post fabrication consistant à réduire finement les dimensions des disques trop grands grâce à une gravure photo-assistée en milieu fluide. Après avoir réalisé et ajusté ce dispositif, les chercheurs ont injecté de la lumière infrarouge dans le guide d'onde, et analysé le spectre radiofréquence de cette lumière en sortie du dispositif. Au dessus du seuil, lorsque les résonateurs deviennent des oscillateurs, un pic mécanique fin par oscillateur apparaît dans ce spectre. En augmentant progressivement l'intensité de la lumière connectant les oscillateurs, ces pics distincts sont remplacés de manière abrupte par un pic unique. Il correspond à une fréquence commune d'oscillation pour tous les oscillateurs : c'est le phénomène de verrouillage en fréquence.

### En savoir plus

[Light-Mediated Cascaded Locking of Multiple Nano-Optomechanical Oscillators](#)

E. Gil-Santos, M. Labousse, C. Baker, A. Goetschy, W. Hease, C. Gomez, A. Lemaître, G. Leo, C. Ciuti et I. Favero

*Physical Review Letters* (2017), doi:10.1103/PhysRevLett.118.063605

### Contact chercheur

Ivan Favero, directeur de recherche CNRS

### Informations complémentaires

**Matériaux et phénomènes quantiques** (MPQ, CNRS/Univ. Paris Diderot)

**Institut Langevin** (CNRS/ESPCI Paris/PSL)

**Centre de nanosciences et de nanotechnologies** (C2N, CNRS/Univ. Paris-Sud/Univ. Paris Saclay/Univ. Paris Diderot)

cnrs

www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp

Illustration du bandeau : © Emmanuel Perrin/CNRS Photothèque



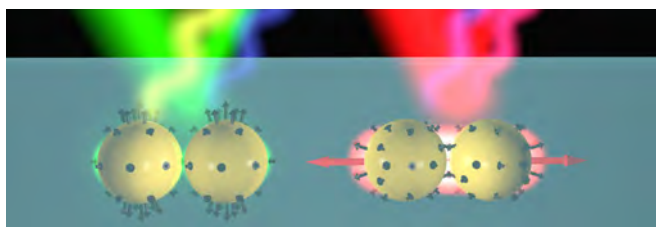
### Une vibration acoustique inédite détectée grâce au couplage électromagnétique entre nanoparticules

Janvier 2017

Des physicien-ne-s viennent de caractériser le couplage mécanique entre des nanoparticules métalliques maintenues dans une matrice de polymère et d'identifier les modes vibratoires, individuels ou couplés, obtenus suivant la longueur d'onde de la lumière utilisée. Un nouveau mode de vibration des nanoparticules couplées a ainsi été mis en évidence, à très basse fréquence, résultat de l'hybridation de modes de vibration habituellement invisibles en spectroscopie Raman.

L'un des défis technologiques de ces dernières années est le développement de systèmes nano-electro-mecaniques (NEMS) opérant à des fréquences allant du GHz au THz. L'un des constituants fondamentaux de ces systèmes est le nano-résonateur mécanique, dont la fréquence de vibration très élevée, du GHz au THz, en fait un composant de choix pour des nanohorloges ou nanobalances ultraprécises. La nanoparticule, dont les fréquences de vibrations sont inversement proportionnelles au diamètre, constitue le nano-résonateur le plus élémentaire. Toutefois, en dehors de ce système bien compris, des questions demeurent. Par exemple, que se passe-t-il lorsque deux nano-résonateurs se trouvent à proximité l'un de l'autre ? Des chercheurs de l'institut Lumière Matière (iLM, CNRS/Univ. Lyon 1) à Villeurbanne et du Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB, CNRS/Univ. Bourgogne/UTBM) à Dijon, ont apporté la réponse, en combinant des mesures optiques, réalisées par l'application d'une lumière incidente sur des ensembles de nanoparticules d'or, à des simulations numériques, permettant de décrire les vibrations de paires de nanoparticules proches. Les résultats de cette étude viennent de paraître dans la revue *Nano Letters*.

Au cours de cette étude, les chercheurs ont synthétisé des nanosphères d'or, dont les diamètres varient de 12 à 100 nm, qu'ils ont ensuite immobilisées dans une matrice polymérique. En fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente appliquée aux échantillons réalisés, ceux-ci révèlent des spectres d'absorption à deux résonances. La première est associée aux nanoparticules isolées. Elle correspond à l'oscillation collective, résonante, de leurs électrons lorsqu'elles sont éclairées par une lumière verte, plus connue sous le nom de résonance plasmon de surface dipolaire. La seconde résonance apparaît lorsque les nanoparticules sont excitées avec une lumière de couleur rouge. Elle résulte du couplage électromagnétique entre des nanoparticules suffisamment proches, contenues dans des matrices polymériques différentes, allant du dimère au multimère.



Représentation artistique des expériences de spectroscopie Raman réalisées sur des nanoparticules d'or dans une matrice de polymère, conduisant à la détection de modes de vibration individuels ou couplés selon la longueur d'onde utilisée. © J. Margueritat - CNRS / Univ. Lyon 1

Ces échantillons ont ensuite été étudiés par spectroscopie Raman très basse fréquence en fonction de la longueur d'onde d'excitation. Cette technique consiste à mesurer la diffusion inélastique de la lumière, c'est-à-dire la diffusion de photons ayant gagné ou perdu de l'énergie par rapport au photon incident, par certains modes de vibration de nano-objets. Les mesures très précises obtenues ont pu être réalisées grâce au développement d'un micro-spectromètre Fabry-Pérot versatile en longueur d'onde, réalisé dans le cadre de travaux antérieurs<sup>1</sup>. L'excitation en résonance avec le plasmon dipolaire a conduit à l'observation attendue du mode de vibration, quadrupolaire, des nanoparticules prises isolément. En revanche, l'excitation en résonance avec le plasmon correspondant au couplage entre deux particules proches a permis deux observations inédites : un accroissement de sensibilité considérable, soit une augmentation du signal d'un facteur 10 000, et la détection d'un second mode de vibration à une fréquence inférieure d'environ 10 GHz (plus ou moins 3 GHz) que celles observées habituellement. Ce mode de vibration s'avère lié à l'effet du couplage mécanique entre les nanoparticules proches résultant de l'interaction avec la matrice de polymère environnante. En effet, les simulations numériques réalisées avec un dimère de nanoparticules d'or inséré dans une matrice de polymère montrent que la vibration observée peut être attribuée au mode de vibration en opposition de phase issue de l'hybridation des modes de vibrations dipolaires de chacune des nanoparticules.

Cette étude ouvre des perspectives nouvelles pour l'étude du couplage mécanique à l'échelle nanométrique. Ces objets nanométriques, qui s'avèrent très dépendants de la matière qui les entoure, interagissent très bien avec la lumière, offrant ainsi la possibilité de les utiliser comme de véritables « sonde du milieu environnant ». La forte exaltation observée permet notamment d'envisager des mesures Raman très basse fréquence sur un dimère individuel, de manière à s'affranchir des effets d'élargissement inhomogènes liés à la dispersion, en forme et en taille, d'une assemblée de nanoparticules. La corrélation des vibrations d'un dimère avec sa morphologie précise, peut ainsi être obtenue par microscopie électronique. Une meilleure compréhension du processus de couplage plasmon-vibration dans les dimères ouvrira la voie vers le développement de nanorésonateurs opto-mécaniques, dont les propriétés de diffusion inélastique pourront être pilotées par la longueur d'onde d'excitation et/ou son état de polarisation.

<sup>1</sup> projet ANR JCJC NANOVIP « NANO-objet unique pour l'étude de l'interaction Vibration acoustique/ Plasmon : vers la spectroscopie Basse Fréquence exaltée de surface », lancé en 2013 et terminé en octobre 2016.

### En savoir plus

[Mechanical coupling in gold nanoparticles supermolecules revealed by plasmon-enhanced ultralow frequency Raman spectroscopy](#)

Adrien Girard, Hélène Gehan, Aurélien Crut, Alain Mermet, Lucien Saviot et Jérémie Margueritat

*Nano Letters* (2016), doi:10.1021/acs.nanolett.6b01314

### Contact chercheur

Jeremie Margueritat, chargé de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Institut Lumière Matière (iLM, CNRS/Univ. Lyon 1)

Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB, CNRS/Univ. Bourgogne/UTBM)



### Contrôle de l'absorption lumineuse d'une nanosphère d'or assistée par une nanosphère d'argent

Mars 2017

La présence d'une nanosphère d'argent au voisinage d'une nanoparticule d'or influence drastiquement la réponse de celle-ci, et ainsi son échauffement suite à une illumination laser. Il s'agit d'une manifestation expérimentale de l'effet Fano au sein d'une nanostructure métallique.

Le développement de la spectroscopie optique de nano-objets individuels, allié à une synthèse fine de nanostructures modèles, permet d'envisager une compréhension et un contrôle des phénomènes de couplage et de transfert d'énergie survenant à l'intérieur même d'un nano-objet unique. Cependant, les difficultés sont multiples, même en considérant un nano-objet relativement simple constitué de deux nano-billes métalliques. La synthèse de tels objets est délicate car elle nécessite une liaison robuste entre les deux sphères et un contrôle fin de la distance les séparant. Par ailleurs, pour observer l'influence de l'une sur la réponse optique de l'autre, il faut être capable de mesurer sélectivement leurs réponses individuelles. Ceci s'avère impossible en spectroscopie linéaire d'absorption en champ lointain, qui donne accès à la réponse optique du dimère mais pas à celle de chacune des sphères qui le composent.

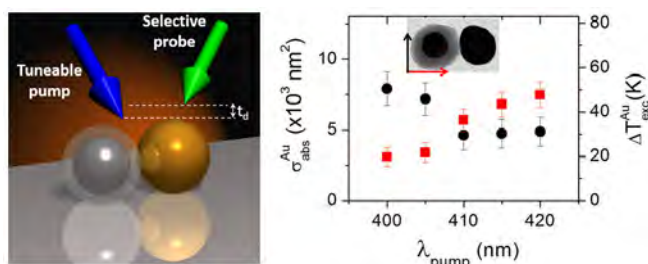
Pour lever cette difficulté, les physiciens de l'Institut Lumière Matière (ILM, CNRS/Univ. Lyon 1), en collaboration avec une équipe espagnole, ont réalisé des expériences de spectroscopie non-linéaire à deux couleurs sur une nanosphère d'or d'un diamètre de l'ordre de 50 nanomètres, séparée par une quinzaine de nanomètres d'une nanosphère d'argent de

diamètre équivalent. Ils ont observé pour la première fois la modification drastique de l'absorption, et par conséquent de l'échauffement de la nano-bille d'or, induite par la présence de la nanosphère d'argent. Ces travaux expérimentaux confirment un effet prévu par la théorie dès 2008 mais qui n'avait encore jamais observé. Ils sont publiés dans la revue *Nano Letters*.

En pratique, les chercheurs chauffent le nano-objet composé des deux sphères à l'aide d'une première impulsion laser bleue, appelée pompe. Ils peuvent faire varier sa longueur d'onde pour qu'elle soit fortement absorbée par les deux sphères : la nanosphère d'or présente en effet un continuum d'absorption, tandis que l'absorption de la nanosphère d'argent possède un pic bien net associé à sa résonance plasmonique. Les chercheurs peuvent également modifier la polarisation de l'impulsion pompe, c'est-à-dire l'orientation du champ laser par rapport à l'axe défini par les deux nanosphères. Ils envoient ensuite une seconde impulsion laser verte, dite sonde, dont la longueur d'onde est choisie pour obtenir un signal sensible uniquement à l'échauffement de la sphère d'or.

Il apparaît que lorsque la longueur d'onde de l'impulsion de pompe est proche de la résonance plasmonique de l'argent, la nano-bille d'argent influence fortement la réponse de la nano-bille d'or, permettant, selon la longueur d'onde et/ou la polarisation de l'impulsion de pompe utilisées, d'augmenter ou de réduire son absorption, et par conséquent son échauffement. Cette expérience représente la première observation expérimentale d'un effet Fano sur l'absorption d'une structure plasmonique, c'est-à-dire des interférences constructives ou destructives entre deux mécanismes d'absorption distincts, l'un discret et l'autre continu.

Ce domaine prometteur ouvre la voie au façonnage de l'échauffement à l'échelle nanométrique, processus essentiel à la miniaturisation de composants optiques.



Dépendance spectrale et en polarisation de l'absorption de lumière par une nanosphère d'or, sous l'influence d'une deuxième nanoparticule métallique.

© Equipe FemtoNanoOptics (ILM, CNRS/Univ. Lyon 1)

### En savoir plus

Fano interference in the optical absorption of an individual gold-silver nanodimer

A. Lombardi, M. P. Grzelczak, E. Pertreux, A. Crut, P. Maioli, I. Pastoriza-Santos, L. M. Liz-Marzan, F. Vallée et N. Del Fatti

*Nano Letters* (2016), doi: 10.1021/acs.nanolett.6b02680

### Contact chercheur

Natalia Del Fatti, Professeur à l'Université Lyon 1 et chercheuse à l'Institut Lumière Matière

### Informations complémentaires

Institut Lumière Matière (ILM, CNRS/Univ. Lyon 1)



### Une électrode en graphène pour améliorer la conduction d'un fil moléculaire

Février 2017

Des physiciens viennent de montrer qu'en connectant un fil moléculaire conducteur à une électrode de graphène, il est possible de réduire de manière importante l'atténuation du courant électrique à la jonction entre la molécule et l'électrode.

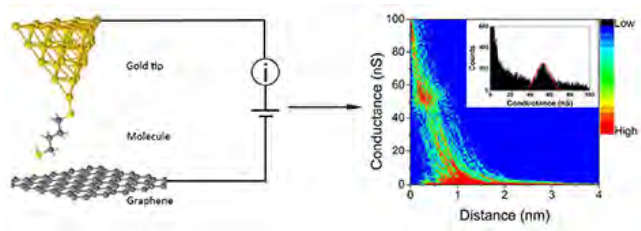
En utilisant des molécules comme composants élémentaires, le domaine de l'électronique moléculaire met directement à profit les propriétés quantiques des molécules. La synthèse chimique permet alors d'ajuster ces propriétés et d'élaborer des architectures variées. Toutefois, à cette échelle et dans ces nouveaux composants, la circulation du courant électrique est bien moins aisée que dans les conducteurs métalliques ou semi-conducteurs : une jonction moléculaire atténue fortement la propagation du courant. Et surtout, cette atténuation augmente exponentiellement<sup>1</sup> avec la longueur de la molécule. Une équipe internationale de physiciens du Service de physique de l'état condensé (SPEC, CNRS/CEA), de l'Université de Liverpool au Royaume-Uni et de l'Université Xi'an-Jiaotong-Liverpool en Chine, viennent de trouver une parade à ce problème en remplaçant l'électrode métallique traditionnelle par une électrode en graphène. Ils ont ainsi observé une nette augmentation du courant mesuré en fonction de la longueur de la molécule. Cette augmentation représente un facteur 2 par rapport à ce qui était connu dans les jonctions moléculaires classiques métal/molécule/métal. Ces résultats supportés par un modèle théorique ont fait l'objet d'une publication dans *Nano Letters*.

Alors qu'habituellement les électrodes pour l'électronique moléculaire sont en or, les physiciens ont utilisé une autre électrode, créée en déposant des

molécules d'alkanedithiols sur un substrat de graphène. Ces molécules, constituées de chaînes hydrocarbonées, présentent des atomes de soufre à leur extrémité qui permettent une meilleure connexion aux électrodes. Ils sont venus les contacter à l'aide de la pointe métallique d'un microscope électronique à effet tunnel pour mesurer leur conductance. La jonction ainsi formée constitue un système asymétrique métal/molécule/graphène et l'évolution de la conductance, mesurée à l'aide du microscope a été déterminée en fonction de plusieurs longueurs de chaînes d'alkanedithiols. Afin d'interpréter les résultats, les chercheurs ont réalisé des simulations numériques de la conductance. Ils ont ainsi démontré que l'asymétrie des électrodes induit également un transfert de charges plus important du côté de l'électrode métallique. En effet, l'interaction métal-molécule est beaucoup plus importante que l'interaction molécule-graphène, essentiellement dominée par des interactions de type van der Waals. En conséquence, ce transfert de charges a pour effet de réduire la barrière de potentiel à l'interface métal-molécule et de faciliter la propagation des électrons dans la molécule. Cet effet est néanmoins contrebalancé par une résistance de contact plus importante au niveau de l'interface molécule-graphène. Cependant, pour des chaînes moléculaires suffisamment longues, ici de l'ordre du nanomètre, la conductance de la jonction asymétrique devient plus importante que dans le cas d'une jonction moléculaire standard.

Ce nouveau type de jonctions asymétriques permet donc de propager plus de courant dans une molécule que les jonctions moléculaires classiques. Ceci apporte une brique de plus à l'architecture de nouveaux circuits, basés sur l'électronique moléculaire basse consommation.

<sup>1</sup> L'atténuation exponentielle du courant est une propriété de la jonction métal/molécule, et particulièrement de l'alignement des niveaux électroniques moléculaires avec les niveaux électroniques du métal.



Représentation d'une jonction moléculaire constituée d'une électrode en graphène, d'une molécule de butanedithiol et d'une pointe STM en or. A droite, histogramme 2D de la conductance en fonction de la distance pointe-graphène.

© Yannick Dappe – SPEC (CNRS/CEA Saclay)

### En savoir plus

Graphene as a promising electrode for low current attenuation in asymmetric molecular junctions

Qian Zhang, Longlong Liu, Shuhui Tao, Congyi Wang, Cezhou Zhao, César González, Yannick J. Dappe, Richard J. Nichols et Li Yang

*Nano Letters* (2016), DOI:10.1021/acs.nanolett.6b03180

### Contact chercheur

Yannick J. Dappe, chargé de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Service de physique de l'état condensé (SPEC, CNRS/CEA)





# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Filter la lumière photon par photon

Octobre 2017

En utilisant un atome artificiel capable de bloquer ou de laisser passer un à un les photons d'un laser, des chercheurs du CNRS, en collaboration avec l'Université du Queensland, ont réalisé un pas important vers le développement de portes logiques optiques quantiques déterministes.

Les photons, grains de lumière sans masse, sont des porteurs idéaux de l'information quantique car ils peuvent se propager sur de longues distances sans perdre leur cohérence. En revanche, il est difficile de mettre au point des portes logiques (porte ET, porte OU...) à deux photons car ils n'interagissent pas entre eux dans le vide. Aujourd'hui, la seule solution est d'utiliser l'interférence quantique de photons identiques. Cependant, ces portes ne fonctionnent pas de façon déterministe, mais probabiliste. Elles donnent le résultat escompté qu'une fois de temps en temps, ce qui implique une sélection à posteriori des événements favorables.

Réaliser des portes quantiques efficaces à deux photons, sur le modèle des portes électroniques classiques, permettrait d'améliorer considérablement les performances des microprocesseurs quantiques. Pour cela, il faut un milieu optique sensible à la présence d'un photon unique. Un atome unique est un tel milieu : un seul photon peut faire

basculer l'atome d'un état où il absorbe la lumière (0) vers un état où il la transmet (1), reproduisant le bit du langage binaire. Mais faire en sorte qu'un photon interagisse avec un seul atome est très difficile. La plupart du temps, il passera sans « voir » l'atome.

Pour remédier à cela, les chercheurs du CNRS ont utilisé des atomes artificiels, des boîtes quantiques semi-conductrices, constitués de quelques dizaines de milliers d'atomes mais se comportant comme un seul. Cet atome artificiel a été placé dans une microcavité optique. Les caractéristiques physiques (forme des miroirs) de cette cavité, sculptée en utilisant les technologies de la microélectronique, ont été calculées pour sélectionner un photon d'une longueur d'onde bien précise. Dans la cavité, l'atome ne pourra ainsi émettre ou absorber que ce type de photon.

Si, en utilisant un laser, on envoie un photon de la bonne fréquence dans la cavité, il va forcément interagir avec l'atome. Il sera absorbé. Puis, l'atome va se désexciter et renvoyer le photon dans la direction d'où il venait. Il n'y aura alors rien en sortie de la cavité (0). Si l'on envoie deux photons, le premier sera absorbé, et l'atome excité laissera passer le deuxième qui apparaîtra en sortie (1). Les deux photons interagissent ainsi entre eux via leur interaction avec l'atome, puisque la capture de l'un conditionne le passage de l'autre. Ce résultat, publié dans *Nature Nanotechnology*, constitue un pas important vers le développement de portes logiques quantiques à deux photons efficaces.

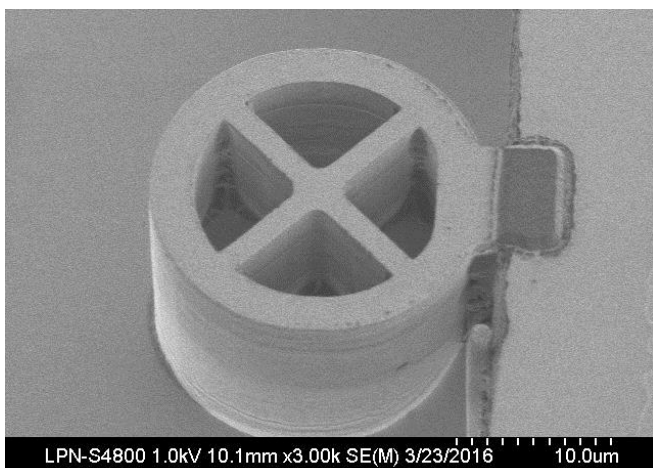


Image de la microcavité

## En savoir plus

[A solid-state single-photon filter](#)

L. De Santis, C. Anton, B. Reznichenko, N. Somaschi, G. Coppola, J. Senellart, C. Gomez, A. Lemaître, I. Sagnes, A. G. White, L. Lanco, A. Auffeves et P. Senellart

*Nature Nanotechnologies* (2017), doi:10.1038/nnano.2017.85

Lire l'article sur le base d'archives ouvertes [arXiv](#)

## Contact chercheur

**Pascale Sennelart, Loïc Lanco** - Centre de nanosciences et de nanotechnologies  
**Alexia Auffeves** - Institut Néel

## Informations complémentaires

**Institut Néel** (laboratoire CNRS associé à Grenoble INP et Univ. Grenoble Alpes)

**Centre de nanosciences et de nanotechnologies** (C2N, laboratoire CNRS, UPSud, Univ. Paris Saclay associé à l'Univ. Paris Diderot)

cnrs

[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)

**Institut de Physique**

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

[inp.com@cnrs.fr](mailto:inp.com@cnrs.fr)

[www.cnrs.fr/inp](http://www.cnrs.fr/inp)

Illustration du bandeau : © Emmanuel Perrin/CNRS Photothèque



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Manipuler des quanta de flux un par un par laser

Mai 2017

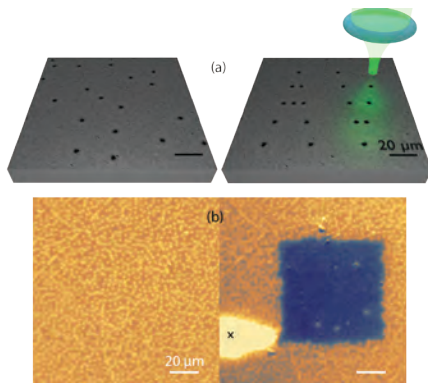
Des physiciens bordelais ont développé une méthode optique rapide et précise, analogue à celle des pinces optiques, pour manipuler individuellement des vortex. Basés sur l'échauffement d'un film de niobium supraconducteur à l'aide d'un laser focalisé, ces travaux s'inscrivent dans un tout nouveau domaine de recherche, la fluxonique, qui offre une alternative à l'électronique basée sur les composants à semi-conducteur.

Les supraconducteurs de type II peuvent être pénétrés par un champ magnétique extérieur sous forme de minces tubes de flux magnétique dont le diamètre est de quelques dizaines de nanomètres. L'enroulement des lignes de courant électrique autour de ces tubes vaut à ces structures le nom de « vortex d'Abrikosov », en référence aux travaux théoriques d'Alexei Abrikosov, prix Nobel de physique en 2003. Ces vortex sont les objets magnétiques les plus compacts portant un quantum de flux magnétique, d'où leur dénomination de fluxons. Les propriétés physiques des supraconducteurs sont étroitement liées à celles des vortex, qui peuvent s'arranger en réseaux, se piéger sur des défauts et se déplacer sous l'effet de courants électriques appliqués dans le supraconducteur. De manière analogue au phénomène de viscosité dans un fluide, le mouvement des vortex induit une dissipation d'énergie, limitant le courant électrique transportable dans le supraconducteur.

Manipuler individuellement des vortex sur des distances micrométriques est un tour de force qui a été récemment réalisé par quelques groupes de recherche en adaptant des techniques de microscopie à balayage de sondes locales. Comme ces méthodes sont intrinsèquement lentes et lourdes à

mettre en œuvre dans un environnement cryogénique, des physiciens du Laboratoire Photonique Numérique et Nanosciences (LP2N, CNRS/Univ. de Bordeaux/IOGS) et du Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine (LOMA, CNRS/Univ. de Bordeaux) ont développé une méthode optique simple et rapide, analogue à celle des pinces optiques, pour manipuler les vortex individuellement. En focalisant sur quelques micromètres un laser, les chercheurs ont réussi à chauffer très localement le film de niobium supraconducteur. Comme l'énergie d'un vortex diminue avec l'élévation de température, le vortex est attiré vers le centre de la tache laser. Ces chercheurs ont montré qu'en ajustant la puissance laser, il est possible de générer une force thermique suffisamment élevée pour arracher tout vortex de son piège, tout en préservant l'état supraconducteur grâce à une élévation de température locale très modérée, inférieure au Kelvin. Ils ont aussi montré qu'ils pouvaient manipuler ces vortex individuellement de manière précise et rapide par déplacement du focus laser et les repositionner sur de nouveaux pièges, formant des structures artificielles sur des distances de l'ordre du millimètre, uniquement limitées par le champ de l'objectif. Les vitesses limites de manipulation de vortex par cette méthode sont imposées par la réponse thermique du supraconducteur et peuvent atteindre les km/s.

Ces travaux publiés dans *Nature Communications* ouvrent la voie à divers régimes de manipulation permettant de mieux comprendre les interactions entre vortex, essentielles pour les applications industrielles axées sur l'extension des courants critiques. Ils ouvrent aussi de nouveaux horizons dans le contrôle optique rapide de jonctions Josephson par manipulation de vortex individuels, la manipulation de textures de spin dans des structures hybrides, ou encore l'élaboration de simulateurs quantiques basés sur la structuration d'atomes froids dans des réseaux de pièges magnétiques.



Les vortex d'Abrikosov sont générés dans un film de Niobium lors de son refroidissement sous champ magnétique en dessous de la température critique de supraconductivité (environ 9 K). Une image optique de ces nano-objets magnétiques est obtenue par la rotation de polarisation de la lumière qu'ils engendrent dans un grenat placé sur le supraconducteur. Chaque vortex peut être dépiégé et entraîné par un faisceau laser focalisé d'une dizaine de microwatts, puis repositionné de manière permanente sur un autre piège en coupant le laser. Deux exemples de manipulation de vortex sont présentés : (a) 19 vortex sont restructurés pour former les lettres AV symbolisant « Abrikosov Vortices » ; (b) en un tiers de seconde, une région supraconductrice d'une centaine de microns est débarrassée de ses vortex, déposés dans une région voisine marquée par la croix. © LP2N

## En savoir plus

Optical manipulation of single flux quanta

I.S. Veshchunov, W. Magrini, S.V. Mironov, A.G. Godin, J.-B. Trebbia, A.I. Buzdin, Ph. Tamarat et B. Lounis

*Nature Communications* (2016), doi:10.1038/ncomms12801

Retrouvez l'article sur les bases d'archives ouvertes [ArXiv](#) et [HAL](#)

## Contact chercheur

Brahim Lounis, Professeur à l'Université de Bordeaux et chercheur au LP2N

## Informations complémentaires

Laboratoire Photonique, Numérique, Nanosciences (LP2N, CNRS/IOGS/Univ. Bordeaux)

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



www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp

Illustration du bandeau : © Emmanuel Perrin/CNRS Photothèque



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Transporter l'information stockée sur un électron unique

Janvier 2017

Des physiciens viennent de réaliser un canal permettant de transférer un électron unique entre deux boîtes quantiques distantes de 4 micromètres sans perdre l'information stockée sur ce dernier.

Un électron unique piégé dans une nanostructure semi-conductrice constitue une mémoire magnétique élémentaire pour stocker un bit d'information quantique. Cette mémoire est bien protégée par son environnement solide, mais si l'on souhaite l'utiliser pour communiquer ou calculer, encore faut-il être capable de déplacer cette information en la préservant. Jusqu'à présent, cela n'était possible qu'à l'échelle de quelques centaines de nanomètres et nécessitait le contrôle complexe de réseaux de boîtes quantiques couplées par effet tunnel. Des physiciens de l'Institut Néel (CNRS) en collaboration avec des chercheurs japonais et allemands viennent de concevoir et réaliser un dispositif permettant de transférer l'information stockée sur le spin d'un électron unique entre deux boîtes quantiques distantes de 4 microns. Ils ont pour cela réalisé un canal vide d'électron entre deux boîtes semi-conductrices et propulsé dans ce canal l'électron stocké dans l'une des deux boîtes à l'aide d'une onde acoustique de surface. La durée de transfert, de l'ordre de la nanoseconde, est alors assez rapide pour que l'information portée par l'électron ne soit pas détruite par les mécanismes de relaxation et de décohérence. Ce travail est publié dans la revue *Nature Nanotechnology*.

Pour réaliser leurs boîtes quantiques, les chercheurs ont déposé de fines grilles d'or à la surface d'une couche d'arséniure de gallium et d'aluminium (AlGaAs) déposée sur un substrat d'arséniure de gallium (GaAs). Ils piègent ainsi des électrons se déplaçant librement à l'interface entre les deux matériaux semi-conducteurs à l'aide du potentiel électrostatique créé par les grilles. Ce dispositif leur permet aussi de réaliser *in situ* un électromètre qui leur permet de mesurer simultanément la présence d'un électron dans la boîte et son état de spin. Des travaux antérieurs avaient déjà permis aux physiciens de conserver pendant quelques millisecondes une information de spin stockée sur un électron unique et piégé. Pour transférer cet électron entre deux boîtes, les chercheurs ont utilisé le même principe de grille électrostatique pour réaliser un canal quasi unidimensionnel et vide d'électrons entre deux boîtes quantiques statiques et séparées de 4 micromètres. L'électron se déplace alors dans des boîtes quantiques en mouvement générées dans le canal par effet piézoélectrique grâce à l'envoi contrôlé d'onde acoustique de surface à une fréquence de 2.6 GHz. L'électron se déplace alors à la vitesse du son et met 1.3 ns pour passer d'une boîte quantique à l'autre. La procédure complète de transfert d'information à l'aide d'électrons uniques revient alors à stocker une information de spin dans l'électron initialement piégé dans la première boîte quantique statique, à l'injecter dans une boîte quantique en mouvement afin de le transférer dans la seconde boîte statique. Finalement, le spin de l'électron est mesuré dans cette seconde boîte quantique. En répétant cette procédure une dizaine de milliers de fois, les physiciens ont quantifié la fidélité du transfert d'information. Celle-ci approche actuellement les 65 %. Elle est limitée pour l'instant par des processus de dépolarisation de spin principalement actif au cours l'injection entre boîtes quantiques statiques et en mouvement.

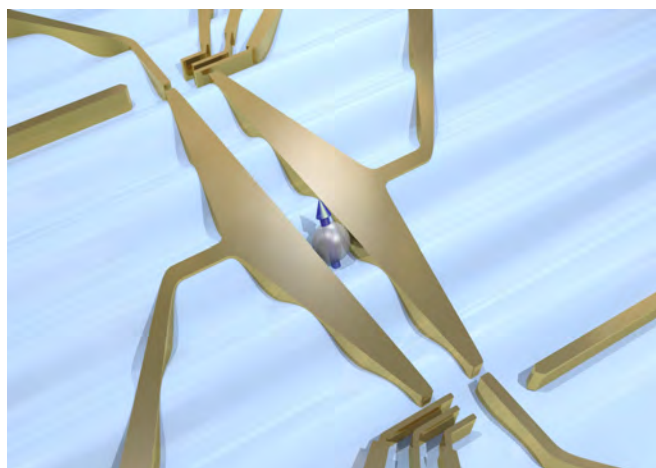


Illustration du transfert d'un électron unique assisté par une onde acoustique de surface. Des grilles métalliques, de quelques dizaines de nanomètre de largeur, permettent de définir deux boîtes quantiques connectées par un canal unidimensionnel dans lequel se propage l'électron. © Benoit Bertrand - NEEL

### En savoir plus

[Fast spin information transfer between distant quantum dots using individual electrons](#)

B. Bertrand, S. Hermelin, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A. Ludwig, A. D. Wieck, C. Bäuerle et T. Meunier

*Nature Nanotechnology* (2016), doi:10.1038/nnano.2016.82

### Contact chercheur

Tristan Meunier, chargé de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Institut Néel (CNRS)



[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16  
T 01 44 96 42 53  
[inp.com@cnrs.fr](mailto:inp.com@cnrs.fr)  
[www.cnrs.fr/inp](http://www.cnrs.fr/inp)



### Des électrons fortement corrélés dans un résonateur micro-onde de grande finesse

Décembre 2017

En couplant une boîte quantique constituée d'un nanotube et d'un résonateur micro-onde, des physiciens ont pour la première fois accédé à la dynamique de l'effet Kondo. Ils ont montré que dans ce système, le transport des électrons repose uniquement sur les corrélations dans le nuage électronique.

Pour étudier finement les propriétés des gaz d'électron fortement corrélés, les physiciens peuvent, depuis une vingtaine d'années, les isoler dans des circuits électroniques mésoscopiques et modifier les caractéristiques de ce gaz d'électron *in situ*. Toutefois, dans les expériences menées jusqu'à présent, les informations acquises provenaient essentiellement de mesures de transport électronique. En couplant un circuit contenant une boîte quantique à un résonateur micro-onde, des physiciens du Laboratoire Pierre Aigrain ont pour la première fois mesuré la compressibilité d'un gaz d'électrons dans le régime de l'effet Kondo. Ce travail est publié dans la revue *Nature*.

Les physiciens ont élaboré la boîte quantique en isolant entre deux électrodes une portion de quelques centaines de nanomètres d'un nanotube de carbone, lui-même d'un diamètre de quelques nanomètres (Figure c.). La boîte quantique ainsi constituée piège les électrons suivant les trois dimensions spatiales. L'excitation micro-onde est confinée dans

un guide d'onde long d'un centimètre, fabriqué à l'aide d'une couche mince d'un métal supraconducteur. La difficulté expérimentale repose notamment sur le couplage de ces deux éléments sur une puce, en veillant à préserver la propreté du film supraconducteur et celle du nanotube. La sensibilité record de ce dispositif est permise par une nouvelle architecture dans laquelle la boîte quantique est fortement couplée à l'excitation micro-onde qui la sonde et le nanotube de carbone est déposé au-dessus d'une troisième électrode reliée à la cavité micro-onde. Avec ce dispositif, les physiciens mesurent le décalage de la fréquence de résonance de la cavité et en déduisent la compressibilité du gaz d'électrons. Une électrode de grille placée à proximité permet de faire varier l'effet tunnel entre la boîte quantique et les électrodes qui lui sont connectées. De la sorte, les chercheurs activent ou désactivent l'effet Kondo, c'est-à-dire l'existence d'une conductance finie due à la présence d'un spin électronique isolé.

En mesurant le signal micro-ondes transmis à travers la cavité à sa fréquence de résonance propre (environ 7 GHz), les physiciens ont pour la première fois observé directement que l'effet Kondo ne modifiait pas, contre toute attente, le signal micro-onde transmis. Contrairement à un gaz d'électrons libres ordinaire qui décale toujours la fréquence propre de la cavité, la résonance Kondo laisse cette dernière inchangée, bien qu'un courant puisse traverser le gaz d'électrons. Cela signifie que la dynamique interne de charge dans le gaz d'électrons corrélés est « gelée » et que le transfert des électrons repose uniquement sur les corrélations dans le nuage électronique. Cette charge gelée induisant une conductance finie est une pierre angulaire du modèle Kondo mais elle n'avait jamais été observée jusqu'à maintenant.

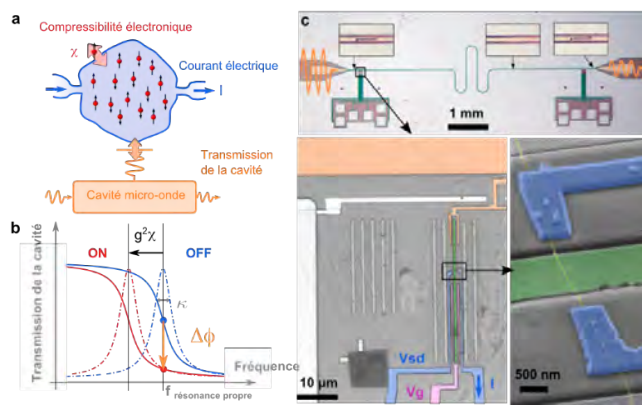


Figure : a. Schéma expliquant la mesure simultanée à l'aide d'une cavité micro-ondes de la compressibilité d'un gaz d'électron qui caractérise sa dynamique interne et du courant électrique le traversant. b. Schéma expliquant la mesure de la compressibilité par la mesure du décalage de la fréquence de résonance de la cavité. c. Images du dispositif couplant une cavité micro-onde sur puce à un circuit électronique fabriqué avec un nanotube de carbone (fil jaune dans l'image en bas à droite).

### En savoir plus

#### Observation of the frozen charge of a Kondo resonance

M. M. Desjardins, J.J. Viennot, M. C. Dartailh, L. E. Bruhat, M. R. Delbecq, M. Lee, M.-S. Choi, A. Cottet et T. Kontos

*Nature* (2017), doi:10.1038/nature21704

### Contact chercheur

Takis Kontos, directeur de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Laboratoire Pierre Aigrain (LPA, CNRS/ENS/UPMC/Univ. Paris Diderot)



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Des composants électroniques en germanène : vers une réalité

Mars 2017

Des physiciens de l'Institut des matériaux, de microélectronique et des nanosciences (IM2NP, CNRS/Univ. Aix Marseille/Univ. Toulon) et du Laboratoire de physique des interfaces et des couches minces (LPICM, CNRS/X) au sein d'une collaboration internationale ont démontré qu'il était possible de garder intact les propriétés électroniques du germanène, cousin du graphène, en effectuant la croissance du germanène sur du graphite. Il est maintenant possible d'envisager la fabrication de composants électroniques fonctionnels à base de germanène.

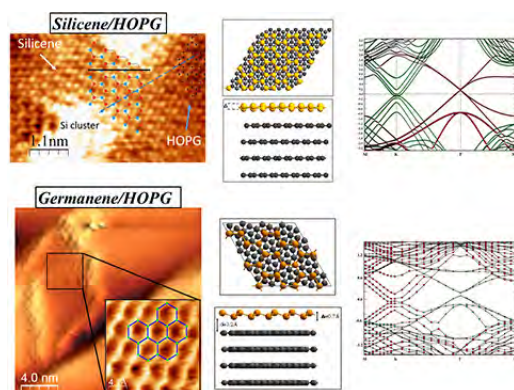
Les propriétés physiques du graphène, un matériau constitué d'une seule couche d'atomes de carbone, sont exceptionnelles à de nombreux points de vue : il est solide, léger, transparent, très bon conducteur de la chaleur et de l'électricité, ... Toutefois, sa structure électronique ne se prête pas à la réalisation de composants pour la microélectronique. Pour cette raison, les chercheurs se tournent vers le germanène, un matériau constitué d'atomes de germanium organisés selon la même structure que le graphène, qui partage les mêmes avantages et qui, en outre, a une structure électronique appropriée pour les applications et compatible avec une proportion importante des composants actuels composés eux aussi de germanium. Une des principales difficultés est de synthétiser de manière efficace des feuilles de germanène.

Pour la première fois, des chercheurs du laboratoire de l'IM2NP de Marseille et du LPICM d'Orsay au sein d'une collaboration internationale ont fabriqué des feuilles bi-dimensionnelles et planes de germanène sans interaction forte avec le substrat, en déposant une couche mono-atomique de germanium sur une

surface clivée de graphite.

Le silicène et le germanène ont des propriétés remarquables identiques à celles du graphène. De plus, ils disposent d'une bande interdite non nulle (contrairement au graphène) qui permet d'envisager la conception de composants de microélectronique à base de ces couches. Ils sont parfaitement compatibles avec la technologie CMOS de l'industrie micro-électronique. Ils sont plus flexibles que le graphène en raison de l'absence des liaisons Pi renforçant la planéité des couches. Enfin leur plus large corrugation de surface ainsi que le couplage spin-orbite qu'ils présentent permet de développer une ingénierie de bande interdite, sans dégrader leurs propriétés électroniques. Pour toutes ces propriétés, leur fabrication est un enjeu crucial que les physiciens viennent de relever. Ils ont fabriqué des feuilles bi-dimensionnelles et planes de germanium avec une structure en nid d'abeille qui correspond à celle du germanène. Pour ce faire, ils ont déposé une couche mono-atomique de germanium sur une surface clivée de graphite. Ils ont ensuite montré par microscopie à effet tunnel que les îlots bi-dimensionnels de germanène n'ont pas de reconstruction de surface et présentent une faible corrugation prouvant l'absence de formation d'alliage et d'hybridation avec le substrat, contrairement à ce qui a été observé sur les substrats métalliques. Enfin, les calculs basés sur la théorie de la densité fonctionnelle montrent l'apparition du cône de Dirac lorsque les feuilles de germanène sont supportées par du graphite. Des résultats similaires, en parfait accord avec les résultats expérimentaux, ont été obtenus avec des feuilles de silicène sur du graphite.

Ce résultat permet d'envisager aujourd'hui la croissance de germanène sur des feuilles de graphène de grande dimension et de mettre à profit la facilité de transférer le graphène. Il offre ainsi une opportunité exceptionnelle de fabriquer des composants électroniques fonctionnels à base de germanène.



A gauche, deux images des couches bi-dimensionnelles de silicène et de germanène sur du graphite enregistrées avec un microscope à effet tunnel. Au milieu et à droite, structures atomiques et électroniques de silicène et de germanène sur du graphite, basées sur les calculs de DFT. © The journal of physical chemistry letters & ACS Nano

## En savoir plus

[van der Waals Heteroepitaxy of Germanene Islands on Graphite](#)

Luca Persichetti, Fatme Jardali, Holger Vach, Anna Sgarlata, Isabelle Berbezier, Maurizio De Crescenzi et Adalberto Balzarotti

*The journal of physical chemistry letters* (2016), doi:10.1021/acs.jpcllett.6b01284

## Contact chercheur

**Isabelle Berbezier**, directrice de recherche CNRS

**Holger Vach**, directeur de recherche CNRS

## Informations complémentaires

Institut des matériaux, de microélectronique et des nanosciences (IM2NP, CNRS/Univ. Aix Marseille/Univ. Toulon)

Laboratoire de physique des interfaces et des couches minces (LPICM, CNRS/X)

cnrs

www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp



# Institut de physique

Communiqués de presse

## Des synapses électroniques capables d'apprendre : vers un cerveau artificiel ?

mars 2017

Des chercheurs du CNRS, de Thales et des Universités de Bordeaux, de Paris-Sud et d'Evry viennent de créer une synapse artificielle capable d'apprendre de manière autonome. Ils ont également réussi à modéliser ce dispositif. Cette dernière étape est fondamentale pour élaborer des circuits plus complexes. Les travaux sont publiés dans *Nature Communications* le 3 avril 2017. [...]

Unité mixte de physique CNRS/Thales

Contact chercheur : Vincent Garcia, [vincent.garcia@cnrs-thales.fr](mailto:vincent.garcia@cnrs-thales.fr)



© Sören Boyn / Unité mixte de physique CNRS/Thales

Illustration artistique de la synapse électronique : les particules représentent les électrons circulant à travers l'oxyde, par analogie avec les neurotransmetteurs dans les synapses biologiques. Le flux d'électrons dépend de la structure en domaines ferroélectriques de l'oxyde. Celle-ci est contrôlée par les impulsions électriques.

## Le premier nano-neurone artificiel capable de reconnaissance vocale voit le jour

septembre 2017

Des chercheurs de l'Unité mixte de physique CNRS/Thales, du Centre de nanosciences et de nanotechnologies (CNRS/Université Paris-Sud), en collaboration avec des chercheurs américains et japonais, viennent de développer le premier nano-neurone artificiel capable de reconnaître des chiffres prononcés par différents locuteurs. Tout comme

le développement récent des synapses électroniques, ce nano-neurone électronique, décrit dans un article de *Nature*, est une avancée clé pour l'intelligence artificielle et ses applications.

Récemment, les algorithmes d'intelligence artificielle sont devenus performants pour la reconnaissance visuelle ou vocale. Mais, l'exécution de ces programmes sur nos ordinateurs conventionnels consomme une énergie dix mille fois supérieure à celle du cerveau humain. Pour réduire la consommation électrique, il faut construire des ordinateurs inspirés du cerveau intégrant un très grand nombre de neurones et de synapses miniaturisés. Cependant, jusqu'ici, personne n'a su fabriquer un nano-neurone artificiel suffisamment stable pour calculer de façon fiable malgré une taille miniature.

Pour la première fois, les chercheurs ont développé un nano-neurone capable de reconnaître des chiffres prononcés par différentes personnes avec un taux de réussite de 99,6 %. Pour parvenir à ce résultat, un oscillateur magnétique aux propriétés très stables a été utilisé. Chaque giration de cette nano-boussole est accompagnée d'une émission électrique, ce qui permet d'imiter les impulsions électriques émises par les neurones biologiques. Dans les prochaines années, ces nano-neurones magnétiques pourront être interconnectés grâce à des synapses artificielles telles que celles récemment développées pour traiter et classer des informations en masse en temps réel.

L'objectif à terme de cette collaboration entre les acteurs de la recherche fondamentale et ceux de la recherche appliquée est de réaliser des puces miniatures intelligentes, consommant très peu d'électricité, capables d'apprendre et de s'adapter aux situations mouvantes et ambiguës du monde réel. Ces puces électroniques trouveront des applications multiples, par exemple pour diriger intelligemment des robots ou des véhicules autonomes, aider les médecins dans leur diagnostic ou encore améliorer les prothèses médicales. Les travaux présentés impliquent des chercheurs de l'Unité Mixte de Physique CNRS/Thales, de l'AIST, du CNST-NIST, et du Centre de Nanosciences et Nanotechnologies (CNRS/Université Paris-Sud).

Unité mixte de physique CNRS/Thales

Contact chercheur : Julie Grollier, [julie.grollier@cnrs-thales.fr](mailto:julie.grollier@cnrs-thales.fr)

## L'accélération laser-plasma pour explorer la matière

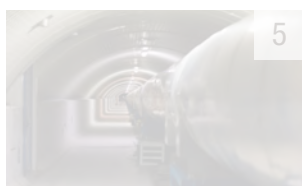
juin 2017

L'équipe de Jérôme Faure, directeur de recherche CNRS, a développé une source d'électrons inédite basée sur l'accélération laser-plasma à partir d'un système laser aux propriétés uniques mis au point par l'équipe de Rodrigo Lopes-Martens, chercheur à l'École polytechnique, et qui permettra à la fois de sonder et d'imager la matière. Ces travaux, prometteurs pour la recherche fondamentale en physique, ont été menés au Laboratoire d'optique appliquée (École polytechnique/CNRS/ENSTA ParisTech). Ils sont publiés dans la revue *Nature Photonics* de mai 2017. [...]

Laboratoire d'optique appliquée

Contact chercheur : Jérôme Faure, [jerome.faure@ensta-paristech.fr](mailto:jerome.faure@ensta-paristech.fr)

THÉMATIQUES



5

SPATIAL - ASTRONOMIE



11

SONDER LA MATIÈRE



25

ÉCHELLE NANO &  
PARTICULES UNIQUES



37

TRANSITIONS DE PHASE  
& ORDRE ET DÉSORDRE



51

GRAINS, FLUIDES  
ET SOLIDES



61

PHYSIQUE ET VIVANT



69

INNOVATION



73

INTERFACE



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Un nouvel état quantique dans un matériau à base de terre-rare ?

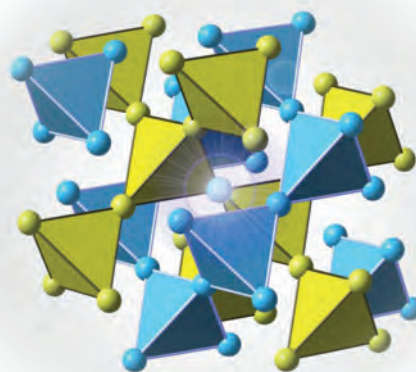
Septembre 2017

Les nouveaux états quantiques de la matière possèdent des propriétés fascinantes, mais ils échappent encore souvent à l'observation expérimentale.

Au sein d'une collaboration internationale, des chercheurs du Laboratoire de physique des solides (Orsay), du Laboratoire national des champs magnétiques intenses (Grenoble) et de l'institut Laue-Langevin (Grenoble) viennent de montrer comment quelques atomes d'ytterbium (Yb) présents en excès dans le minéral à base de terre-rare  $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$  parviennent à créer une pression suffisante afin d'induire une transition de phase vers un ordre magnétique plus conventionnel.

Pour cela, les chercheurs ont réalisé des mesures de diffraction de neutrons et de relaxation du spin du muon dans des conditions extrêmes de température ( $-272,9\text{ }^\circ\text{C}$ ) et de pression (25 000 fois la pression atmosphérique). Ils ont ainsi démontré qu'il existe bien à basse température un état sans ordre magnétique conventionnel, compatible avec la glace quantique mais sensible aux perturbations. Ainsi, en soumettant le matériau dans cet état à de très fortes pressions, les chercheurs ont induit une transition de phase d'un état initial non magnétique vers un état ferromagnétique.

Ces travaux, publiés dans la revue *Nature Communications*, mettent fin à une longue controverse expérimentale en révélant l'effet perturbateur de défauts à l'échelle atomique ayant un véritable impact sur les propriétés macroscopiques du composé. Ils constituent une première étape dans la compréhension de la formation des états quantiques dans les matériaux réels.



*Un défaut atomique au sein de la structure peut être responsable d'une pression sur les atomes voisins, et modifier les propriétés électroniques du matériau.*  
© Edwin Kermarrec/LPS

### En savoir plus

Ground state selection under pressure in the quantum pyrochlore magnet  $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$

E. Kermarrec, J. Gaudet, K. Fritsch, R. Khasanov, Z. Guguchia, C. Ritter, K. A. Ross, H. A. Dabkowska et B. D. Gaulin

*Nature Communications* (2017), doi:10.1038/ncomms14810

### Contact chercheur

Edwin Kermarrec, Maître de conférences à l'Université Paris-Sud et chercheur au LPS

### Informations complémentaires

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



www.cnrs.fr

#### Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16  
T 01 44 96 42 53  
inp.com@cnrs.fr  
www.cnrs.fr/inp





# Institut de physique

Actualités scientifiques

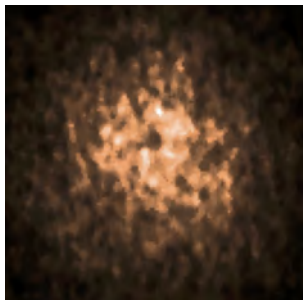
## Un nouvel état quantique de la matière : le gaz d'excitons superfluide

Octobre 2017

Des physiciens ont réalisé la première observation d'une condensation de Bose-Einstein d'un gaz d'excitons. Grâce à l'observation de vortex quantiques, l'équipe de recherche a mis en évidence la superfluidité du gaz, caractéristique de la condensation de Bose-Einstein.

Les excitons sont des paires « électron-trou » issues de l'excitation optique d'un semi-conducteur. Composé de deux fermions (spin demi-entier), les excitons ont donc un caractère bosonique (les bosons ont un spin entier). Il est donc en théorie possible de réaliser une condensation de Bose-Einstein à partir d'un gaz d'excitons. Bien que prédite dès les années 60, cette condensation n'avait pourtant jamais été observée clairement.

En étudiant un gaz d'excitons obtenu dans un semi-conducteur, l'arséniure de gallium, et confiné dans un piège électrostatique de 10 micromètres, des chercheurs de l'Institut des nanosciences de Paris (INSP, CNRS/UPMC) ont constaté qu'en dessous d'un degré kelvin, le gaz devient superfluide, une des signatures de la condensation de Bose-Einstein.



Profil spatial de l'émission lumineuse d'un gaz d'excitons confiné dans un piège électrostatique de 10  $\mu\text{m}$  d'extension spatiale, à une température de 330 mK. Au centre de l'image, on distingue une tâche noire signalant une singularité locale de la densité d'excitons piégés, c'est-à-dire un vortex quantique piégé par le faible désordre électrostatique du potentiel de confinement. D'autres vortex sont visibles en périphérie du nuage d'excitons sur cette image.

La superfluidité a été mise en évidence par la formation de vortex quantiques lors du passage de l'état classique à l'état quantique. Ces vortex apparaissent sous la forme de taches noires facilement reconnaissables dans l'émission optique du gaz d'excitons. Normalement, ils sont très difficiles à observer car en mouvement rapide. Grâce au faible désordre régnant au niveau du potentiel de piégeage électrostatique, ils sont restés en quelque sorte « accrochés ». Pour parvenir à ce résultat, il a fallu un haut niveau de contrôle du gaz d'excitons et de son environnement, obtenu notamment grâce à un confinement quasi modèle.

Dans ces expériences, il est à noter que l'émission optique du gaz d'excitons diminue lors du refroidissement menant à la condensation. Cette observation vient ainsi confirmer les travaux théoriques de Combescot *et al.* de 2007 qui avait prédit qu'un condensat d'excitons devait être majoritairement inactif optiquement, puisque les états d'excitons dits noirs (ils ne peuvent pas émettre de photons) occupent toujours l'énergie la plus basse, seule configuration où la condensation de Bose-Einstein est permise. Grâce au protocole expérimental mis en place, il devient possible d'étudier plus en avant les phases quantiques accessibles au gaz d'excitons. Après l'hélium superfluide, les condensats atomiques ou les supraconducteurs, c'est donc une nouvelle gamme d'états quantiques de la matière, issue cette fois des semi-conducteurs, qui s'offre à nous.

### En savoir plus

#### Quantized Vortices and Four-Component Superfluidity of Semiconductor Excitons

R. Anankine, M. Beian, S. Dang, M. Alloing, E. Cambril, K. Merghem, C. Gomez Carbonell, A. Lemaître and F. Dubin

*Physical Review Letters* (2017), doi:10.1103/PhysRevLett.118.127402

Lire l'article sur le base d'archives ouvertes [ArXiv](#)

### Contact chercheur

François Dubin, chercheur CNRS

### Informations complémentaires

Institut des nanosciences de Paris (INSP, CNRS/UPMC)



[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)

#### Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16  
T 01 44 96 42 53  
[inp.com@cnrs.fr](mailto:inp.com@cnrs.fr)  
[www.cnrs.fr/inp](http://www.cnrs.fr/inp)



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Traverser une transition de phase topologique en contrôlant la température

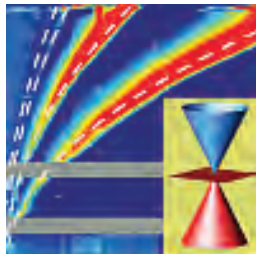
Avril 2017

Pour la première fois, des physiciens ont traversé continûment une transition de phase topologique et montré l'universalité de la vitesse des quasi-particules apparaissant lors de cette transition.

Dans un cristal, la dynamique des électrons est fortement affectée par leur interaction avec le réseau périodique formé par les atomes. Celle-ci peut adopter des comportements exotiques semblables à ceux de particules élémentaires ou de haute énergie. Dans le graphène par exemple, la vitesse des électrons ne dépend pas de leur énergie. Ceux-ci adoptent donc un comportement analogue à celui de particules élémentaires de masse nulle dans un espace bidimensionnel. Dans les matériaux à trois dimensions, ce comportement est associé à une transition de phase topologique. Ce phénomène est habituellement observé en changeant la composition du matériau étudié, et donc en comparant des mesures

effectuées successivement sur des échantillons différents. Pour la première fois, des physiciens montpellierains du Laboratoire Charles Coulomb (L2C, CNRS/Univ. Montpellier), en collaboration avec le Laboratoire national des champs magnétiques intenses (LNCMI, CNRS) de Grenoble, viennent d'observer cette transition sur un même échantillon, composé d'un alliage de mercure, cadmium et tellure ( $\text{Hg}_{0.845}\text{Cd}_{0.155}\text{Te}$ ) en changeant non pas la composition, mais la température. Cela leur a notamment permis d'induire cette transition de manière continue et réversible et d'observer le comportement typique de « fermions de Kane ». Pour cela, ils ont utilisé un dispositif expérimental unique de spectroscopie par magnéto-absorption, permettant la mesure de transitions optiques à très basses énergies, dans la gamme de fréquences térahertz. Ce travail a également permis de mettre en évidence l'universalité de la vitesse des fermions de Kane, constante quels que soient le gap et la composition du cristal de  $\text{HgCdTe}$ .

Les prolongements de ces résultats vont aussi bien vers les applications en optoélectronique térahertz que vers l'exploration fondamentale des matériaux dits « isolants topologiques ». Ce travail est publié dans la revue *Nature Communications*.



Etats énergétiques du cristal de  $\text{HgCdTe}$  à la température de transition de phase en fonction du champ magnétique. L'insert représente la relation de dispersion typique du fermion de Kane © L2C (CNRS/Univ. Montpellier)

### En savoir plus

[Temperature-driven massless Kane fermions in  \$\text{HgCdTe}\$  crystals](#)

F. Teppe, M. Marcinkiewicz, S. S. Krishtopenko, S. Ruffenach, C. Consejo, A. M. Kadykov, W. Desrat, D. But, W. Knap, J. Ludwig, S. Moon, D. Smirnov, M. Orlita, Z. Jiang, S. V. Morozov, V.I. Gavrilenko, N. N. Mikhailov et S. A. Dvoretiskii

*Nature Communications* (2016), doi:10.1038/ncomms12576

Retrouvez l'article sur la base d'archives ouvertes [arXiv](#)

### Contact chercheur

**Frédéric Teppe**, chargé de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Laboratoire Charles Coulomb (L2C, CNRS/Univ. Montpellier)

Laboratoire national des champs magnétiques intenses (LNCMI, CNRS)



[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

[inp.com@cnrs.fr](mailto:inp.com@cnrs.fr)

[www.cnrs.fr/inp](http://www.cnrs.fr/inp)

Illustration du bandeau : © Emmanuel Perrin/CNRS Photothèque



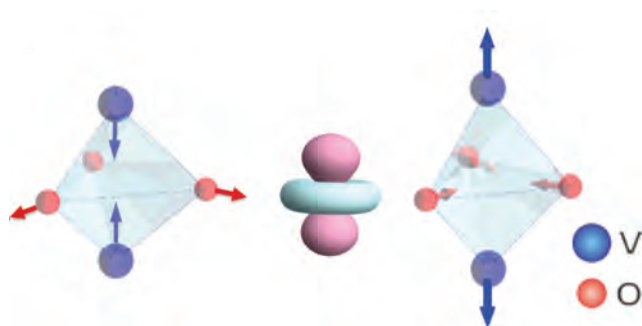
# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Des états transitoires de la matière entre métal et isolant

Mai 2017

En combinant l'état de l'art en matière de sources d'impulsions lasers femtosecondes et de techniques de mesures résolues en temps, une équipe formée par des chercheurs du Laboratoire de physique des solides (LPS, CNRS/UPSud/Univ. Paris Saclay), du Laboratoire d'optique appliquée (LOA, CNRS/X/ENSTA), du Laboratoire des solides irradiés (LSI, CNRS/X/CEA) et du Synchrotron SOLEIL, en collaboration avec l'Ecole supérieure d'études avancées de Trieste (Italie) et les universités américaines de Berkeley et Stanford, a mis en évidence un nouvel état de phase transitoire dans un isolant de Mott, le sesquioxide de vanadium. L'interaction du matériau avec des impulsions laser ultracourtes permet de chauffer les électrons de manière significative tout en laissant le réseau froid. Les physiciens ont ainsi observé un durcissement du réseau d'une durée de vie de quelques picosecondes. Ce travail publié dans la revue *Nature Communications* s'avère prometteur pour la réalisation d'une nouvelle génération de switches électroniques ultra-rapides.



Représentation des déplacements atomiques conduisant à l'effet de durcissement suite à une impulsion laser femtoseconde dans  $V_2O_5$  © LPS

### En savoir plus

[Ultrafast evolution and transient phases of a prototype out-of-equilibrium Mott-Hubbard material](#)

G. Lantz, B. Mansart, D. Grieger, D. Boschetto, N. Nilforoushan, E. Papalazarou, N. Moisan, L. Perfetti, V. L. R. Jacques, D. Le Bolloch, C. Laulhe, S. Ravy, J.-P. Rue, T.E. Glover, M.P. Hertlein, Z. Hussain, S. Song, M. Chollet, M. Fabrizio et M. Marsi

*Nature Communications* (2017), doi:10.1038/ncomms13917

### Contact chercheur

Marino Marsi, enseignant-chercheur, LPS

### Informations complémentaires

Laboratoire de physique des solides (LPS, CNRS/UPSud/Univ. Paris Saclay)  
Laboratoire d'optique appliquée (LOA, CNRS/X/ENSTA)  
Laboratoire des solides irradiés (LSI, CNRS/X/CEA)  
Synchrotron SOLEIL (CNRS/CEA)

cnrs

www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16  
T 01 44 96 42 53  
inp.com@cnrs.fr  
www.cnrs.fr/inp

Illustration du bandeau : © Emmanuel Perrin/CNRS Photothèque



### Une cartographie des effets quantiques pour optimiser la mobilité dans les semi-conducteurs organiques

Décembre 2017

Le contrôle des effets de localisation quantique des électrons pourrait permettre d'améliorer les performances des semi-conducteurs organiques pour l'électronique, ouvrant la voie à des applications inédites.

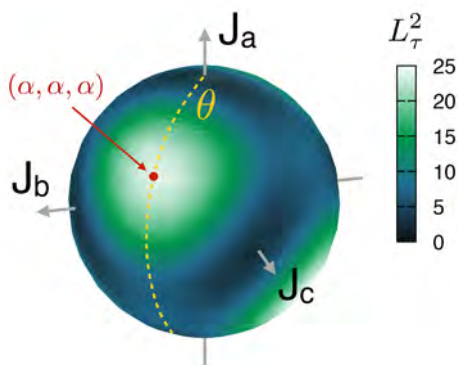
L'électronique est dominée par l'industrie du silicium : ce matériau est la brique élémentaire à partir de laquelle sont construits les transistors et les microprocesseurs. Dans la recherche de technologies alternatives, les semi-conducteurs organiques moléculaires sont très prometteurs. Ces matériaux plastiques à base de carbone sont légers, flexibles. Ils peuvent être produits à faible coût énergétique et se déclinent dans une infinité de variantes microscopiques. Ces atouts les rendent très attrayants pour de nombreuses applications où le silicium est hors-jeu, comme par exemple la peau artificielle ou les vêtements photovoltaïques. Cependant, dès qu'on s'intéresse aux performances, l'inconvénient majeur est la mobilité très limitée des électrons dans ces composés. Les raisons fondamentales de cette lenteur ont été clarifiées seulement récemment.

Les mauvaises performances électriques de ces matériaux viennent précisément de leur flexibilité. Du fait des faibles forces de cohésion microscopiques régnant dans le matériau, les molécules elles-mêmes ne sont pas rigidement fixées les unes par rapport aux autres. Plus leurs mouvements sont amples, plus ils ralentissent la course des

électrons, par des « chocs » qui en dévient la trajectoire. Ces chocs sont si fréquents dans la matière organique qu'ils peuvent alors « fixer » l'électron momentanément : ce phénomène purement quantique, dénommé « localisation transitoire », est le responsable ultime de la faible mobilité des électrons.

Une percée fondamentale pour contourner ce problème vient d'une étude théorique dirigée par S. Fratini à l'Institut Néel en collaboration avec A. Troisi à l'Université de Liverpool et S. Ciuchi à l'Université de l'Aquila, et publiée dans la revue *Nature Materials*. Certaines structures moléculaires seraient moins sensibles au désordre, et permettraient donc d'augmenter la mobilité des électrons en limitant l'effet de localisation transitoire. L'élément-clé pour comprendre le transfert des électrons dans les solides moléculaires est « l'intégrale de saut », le paramètre microscopique qui mesure le recouvrement des fonctions d'onde entre molécules voisines. Chaque structure moléculaire est caractérisée par des valeurs précises de ces intégrales dans les différentes directions. Or, il a été montré qu'il existe des combinaisons optimales de ces paramètres qui permettraient de minimiser les effets de localisation, permettant d'atteindre des valeurs de mobilité jusqu'à 10 fois supérieures à celles des principaux matériaux existants.

En plaçant les valeurs des intégrales de saut sur une sphère, les chercheurs disposent aujourd'hui d'une carte permettant de visualiser les combinaisons pour lesquelles la mobilité sera optimale. Ce protocole permet de rationaliser la recherche de nouveaux composés : en indiquant clairement où chercher les bons arrangements moléculaires, là où il fallait auparavant tester différentes cristallisations possibles de forme aléatoire, cette étude ouvre la voie à une nouvelle classe de matériaux performants pour l'électronique organique.



Carte de mobilité dans les semi-conducteurs organiques.  $J_a$ ,  $J_b$ ,  $J_c$  sont associés au recouvrement des fonctions d'onde dans les trois directions principales. Les zones en blanc indiquent les configurations optimales à rechercher pour la synthèse de semi-conducteurs organiques à mobilité élevée.

### En savoir plus

[A map of high mobility molecular semiconductors](#)

S. Fratini, S. Ciuchi, D. Mayou, G. Trambly de Laissardière et A. Troisi

*Nature Materials* (2017), doi:10.1038/nmat4970

### Contact chercheur

Simone Fratini, directrice de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Institut Néel, laboratoire CNRS associé à l'Université Grenoble Alpes et à Grenoble INP



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Une nouvelle transition de phase verre-verre observée expérimentalement

Mai 2017

Les verres à basse température affichent toutes sortes de propriétés anormales. De très récents développements théoriques ont prédit l'existence d'une phase vitreuse marginale, la phase de Gardner, qui serait à l'origine de ces anomalies. Un duo de physiciens vient d'obtenir la première confirmation expérimentale de l'existence de cette phase dans un verre granulaire.

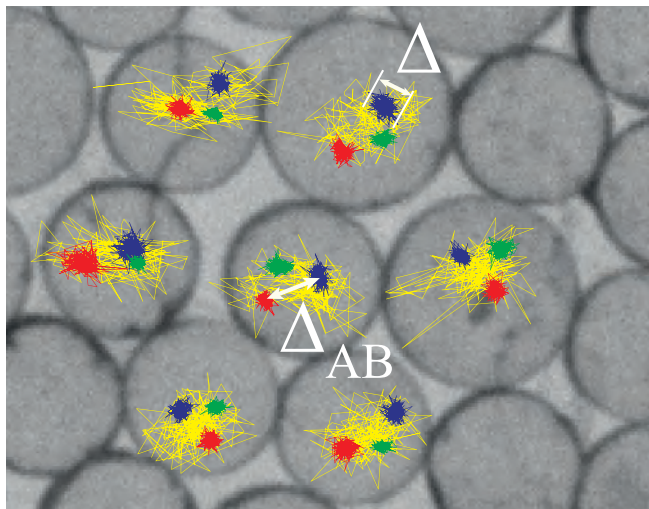
Quand un liquide se solidifie sans que nul ordre n'émerge, il forme un verre. Les molécules se déplacent de plus en plus lentement, jusqu'à être piégées dans un état étrange entre liquide et solide. De nombreuses structures désordonnées sont possibles suivant les conditions de formation du verre. On pourrait penser, qu'une fois le liquide piégé dans un verre particulier, ses propriétés de transport résultent, tout comme dans un cristal, des vibrations des particules autour de leurs positions moyennes, celles-ci définissant un réseau sous-jacent désordonné. Mais il n'en est rien. Les propriétés thermiques ou mécaniques anormales, observées dans ces verres, ne peuvent être expliquées par cette description.

Des travaux théoriques très récents ont montré que ces anomalies peuvent se comprendre comme la rémanence d'une nouvelle transition de phase - la transition de Gardner, qui distingue deux types de solides amorphes :

le verre simple mécaniquement stable et le verre marginalement stable. Des simulations numériques en dimension finie ont confirmé l'existence de cette transition et montré qu'elle est associée à une organisation hétérogène des vibrations des particules au sein des cages formées par leurs voisines.

C'est en s'appuyant sur cette image de cages, que des physiciens des laboratoires Fluides, automatiques et systèmes thermiques (FAST, CNRS/UPSud/Univ. Paris Saclay) et Gulliver (CNRS/ESPCI Paris) ont obtenu la première confirmation expérimentale de l'existence de la phase de Gardner dans un verre granulaire, réalisée au Service de physique de l'état condensé (SPEC, CNRS/CEA). Ce verre est reconnu comme un matériau vitreux modèle. Les chercheurs ont suivi les trajectoires individuelles des particules composant celui-ci au moment de la formation du verre. Dans un premier temps, par compression adiabatique, ils ont formé un verre granulaire au sein duquel chaque particule vibre dans une cage formée par ses voisines. Ensuite, ils ont démontré qu'il existe une densité au-delà de laquelle les cages se divisent en plusieurs « sous-cages » définies par les particules voisines avec lesquelles le nombre de collisions augmente. Ce seuil observé expérimentalement est une signature de la transition de phase de Gardner.

Ce résultat fondamental, majeur pour la compréhension et l'optimisation des propriétés des verres, devrait susciter une nouvelle lecture des propriétés anormales de certains verres, à la lumière de l'existence de cette nouvelle phase vitreuse.



La transition de Gardner révélée par l'imbrication fractale de cages de plus en plus petites au sein d'un verre granulaire. © Antoine Seguin et Olivier Dauchot

### En savoir plus

[Experimental Evidence of the Gardner Phase in a Granular Glass](#)

A. Seguin et O. Dauchot

*Physical Review Letters* (2017), doi:10.1103/PhysRevLett.117.228001

Retrouvez l'article sur les bases d'archives ouvertes [arXiv](#) et [HAL](#)

### Contact chercheur

Olivier Dauchot, directeur de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Laboratoire Gulliver (CNRS/ESPCI Paris)

Laboratoire Fluides, automatiques et systèmes thermiques (FAST, CNRS/UPSud/Univ. Paris Saclay)

Service de physique de l'état condensé (CNRS/CEA)

cnrs

www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp

Illustration du bandeau : © Emmanuel Perrin/CNRS Photothèque



### Quand un barrage de photons cède dans une fibre optique

Octobre 2017

Des physiciens ont observé que la rupture d'un barrage de photons dans une fibre optique présente une analogie rigoureuse avec celle d'un barrage en hydrodynamique. Ces travaux constituent la première observation expérimentale de prévisions théoriques faites par le mathématicien G.B. Whitham.

Des chercheurs du laboratoire Physique des lasers, atomes et molécules (PhLAM, CNRS/Univ. Lille 1), en collaboration avec l'Université Ferrara en Italie, ont observé l'apparition d'une onde de choc et d'une onde de raréfaction lors de la rupture d'un barrage de photons dans une fibre optique. Ces signatures sont typiques d'ondes engendrées lors d'une rupture d'un barrage en hydrodynamique, telles que présentées dans la théorie de la modulation de Whitham.

Pour réaliser ces observations, les chercheurs se sont placés dans un régime de fonctionnement où la dynamique du système optique est régie par l'équation de Schrödinger non linéaire défocalisante, qui décrit aussi la propagation d'ondes en eaux peu profondes.

En injectant à l'entrée de la fibre optique un signal présentant une variation brutale d'intensité (Fig. 1(b)), on obtient une analogie directe avec un barrage en hydrodynamique présentant deux niveaux distincts de fluide (Fig 1(a), partie de droite de l'image entourée par une ellipse rouge où le barrage est intact). En se propageant dans la fibre optique, on observe alors la dynamique engendrée lors de la rupture d'un barrage (Fig.1(a), partie gauche de l'image entourée par une ellipse verte où le barrage est rompu et Fig. 1(c)).

La figure 1(c) montre clairement l'apparition d'une onde de choc,

caractérisée par une oscillation rapide et d'une onde de raréfaction reliée par un plateau, comme le prédit la théorie de Whitham, en excellent accord avec les simulations numériques (traits verts).

La grande souplesse de ce système expérimental a permis de mener cette étude sur une large gamme de régimes, par exemple un régime particulier ou, au milieu de ces faisceaux lumineux très intenses, une zone d'ombre se forme. En hydrodynamique, il s'agit d'un point où la pression est nulle. Les chercheurs ont également étudié le cas où la variation d'intensité en entrée est très importante, (il est possible de faire varier l'intensité relative entre deux paliers de 1 à 20). Ainsi, au-delà d'une valeur critique de variation, un état d'auto-cavitation (instant où l'intensité lumineuse s'annule) a même été rapporté pour la première fois, là encore en excellent accord avec les prévisions issues de la théorie de Whitham.

Ces observations ont nécessité d'une part la mise en place d'un système original de compensation des pertes dans la fibre optique, et d'autre part un oscilloscope à échantillonnage optique afin d'atteindre des résolutions temporelles de l'ordre de la picoseconde, condition indispensable pour observer ces phénomènes.

Ces travaux, qui ont été publiés dans la revue *Physical Review Letters*, se démarquent complètement d'autres études réalisées dans des systèmes physiques où la dynamique est régie par l'équation de Schrödinger non linéaire. Ici, il est en effet possible d'ajuster finement les conditions initiales afin d'étudier un cas particulier du problème de Riemann, posé au XIX<sup>e</sup> siècle, consistant à trouver des solutions à un système complexe d'équations aux dérivées partielles. Et grâce à sa relative simplicité et sa grande souplesse, ce système physique permettra de réaliser une première étude expérimentale complète de ce problème.

Comme sa dynamique est régie par l'équation de Schrödinger non linéaire, l'ensemble des conclusions pourront être étendues à un grand nombre d'autres domaines de la physique, comme les atomes froids ou l'hydrodynamique par exemple, domaines dans lesquelles les études expérimentales sont plus complexes à mettre en oeuvre et à contrôler.

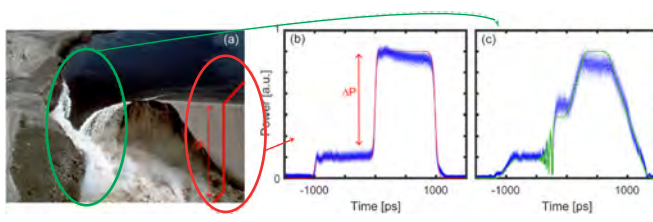


Figure 1 : (a) Photographie de la rupture d'un barrage sur la rivière Teton dans l'Idaho aux USA en 1976. Résultats obtenus en entrée (b) et en sortie (c) d'une fibre optique. Les traits rouges et verts correspondent aux simulations numériques, entrée et sortie respectivement, et les points bleus aux expériences.

### En savoir plus

Dispersive dam-break flow of a photon fluid

G. Xu, M. Conforti, A. Kudlinski, A. Mussot et S. Trillo

*Physical Review Letters* (2017), doi:10.1103/PhysRevLett.118.254101

### Contacts chercheurs

Matteo Conforti, chercheur au PhLAM

Arnaud Mussot, Professeur à l'Université Lille 1 et chercheur au PhLAM

### Informations complémentaires

Laboratoire Physique des lasers, atomes et molécules (PhLAM, CNRS/Univ. Lille 1)



### Des ondes de choc dans des mémoires électroniques non-volatiles

Mars 2017

La migration rapide des « lacunes » d'oxygène dans des oxydes de métaux placés sous un champ électrique explique la forte variation de résistivité de ces matériaux. Les chercheurs à l'origine de ce résultat ont pour la première fois modélisé cette migration par une onde de choc.

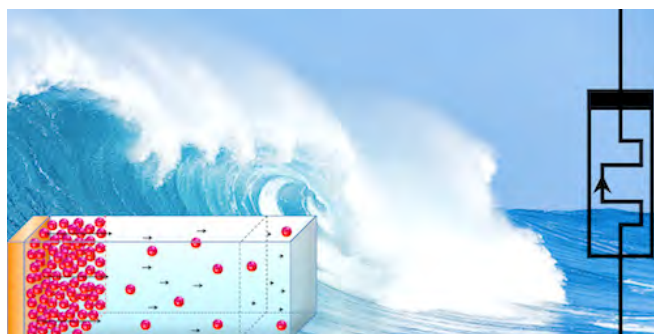
Avec le développement massif des données numériques, les physiciens s'intéressent à des matériaux alternatifs au silicium, brique élémentaire des mémoires non-volatiles actuelles, telles que les disques flash et clés USB. A base de métaux de transition, ces matériaux permettraient de densifier les mémoires et d'augmenter la vitesse de communication des données. Les chercheurs ont montré qu'il est possible de faire varier fortement la résistivité de ces matériaux sur une durée de quelques nanosecondes par l'application d'un champ électrique. Non-volatile et réversible, cette variation peut ainsi être utilisée pour stocker de l'information. Cependant, les mécanismes théoriques de compréhension de ces phénomènes restent lacunaires, ce qui limite l'optimisation de la fabrication de tels matériaux.

Une collaboration internationale, pilotée par le Laboratoire de physique des solides (LPS, CNRS/Univ. Paris-Sud/Univ. Paris Saclay), a confirmé que

cette résistivité électrique est gouvernée par des lacunes d'oxygène, c'est-à-dire des atomes d'oxygène manquants dans la structure cristalline. Par ailleurs, ils ont expliqué que l'effet de bascule de la résistance résulte de la propagation de ces défauts sous forme d'onde de choc. Les simulations théoriques ont ensuite été validées par des expériences menées sur des systèmes à base de manganite. Ces résultats sont publiés dans la revue *Physical Review X*.

Pour modéliser la basculement de résistance, les auteurs ont calculé les modalités d'évolution de la distribution de ces lacunes dans un oxyde de manganèse, suite à l'application brutale d'un champ électrique dans une électrode. Le résultat montre que la variation de résistance suit un processus en deux étapes. Dans un premier temps, les lacunes accumulées au voisinage de l'électrode se propagent à travers l'interface très résistive électrode-matériau, créant un front d'onde de choc. Dans un second temps, cette onde de choc pénètre dans le matériau. Puisque les électrons se déplacent dans le matériau par l'intermédiaire des atomes d'oxygène, la présence de lacunes réduit la mobilité des électrons. Ainsi, dès que l'onde quitte l'interface, la résistance macroscopique du matériau diminue rapidement.

Ces travaux théoriques permettent d'orienter les choix en matière d'ingénierie vers de nouveaux dispositifs constitués de métaux de transition, à l'origine d'une génération future de mémoires plus performantes.



Représentation schématique de l'évolution de l'onde de choc au sein du matériau. La partie orange indique l'électrode métallique, les petites sphères représentent les lacunes d'oxygène et les flèches leur direction de propagation. À droite, symbole électrique des dispositifs de mémoires électroniques non-volatiles (aussi connus comme « memristors »)

© Marcelo Rozenberg - LPS (CNRS/UPSud/Univ. Paris Saclay)

### En savoir plus

Shock waves and commutation speed of memristors

Shao Tang, Frederico Tesler, Fernando Gomez Marlasca, Pablo Levy, V. Dobrosavljevic et Marcelo Rozenberg

*Physical Review X* (2016), DOI:10.1103/PhysRevX.6.011028

### Contact chercheur

Marcelo Rozenberg, directeur de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Laboratoire de Physique des Solides (LPS, CNRS/Univ. Paris-Sud/Univ. Paris Saclay)



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Observer des ondes lumineuses scélérates sur des temps ultra-courts

Avril 2017

Des physiciens ont observé des fluctuations aléatoires de très fortes amplitudes et ultra-rapides de la lumière se propageant dans une fibre optique, en utilisant un dispositif appelé « microscope temporel ».

Comparables à des vagues géantes (appelées « vagues scélérates ») qui apparaissent parfois en mer, les « ondes scélérates optiques » sont des phénomènes extrêmes pouvant se développer lors de la propagation de la lumière dans les fibres optiques. Ces manifestations bien connues théoriquement sont décrites par la même équation de Schrödinger non linéaire à une dimension, permettant des analogies fortes entre le domaine de l'hydrodynamique et celui de l'optique non-linéaire. Les expériences optiques présentent l'avantage de pouvoir être effectuées en laboratoire et d'être répétées aussi souvent que nécessaire. Ainsi est-il possible de développer des vérifications expérimentales poussées de ces processus en faisant varier les conditions initiales. Pour cela, il est nécessaire d'accéder à une mesure de temps ultra-bref, car de tels phénomènes lumineux se déroulent sur des temps inférieurs à la picoseconde.

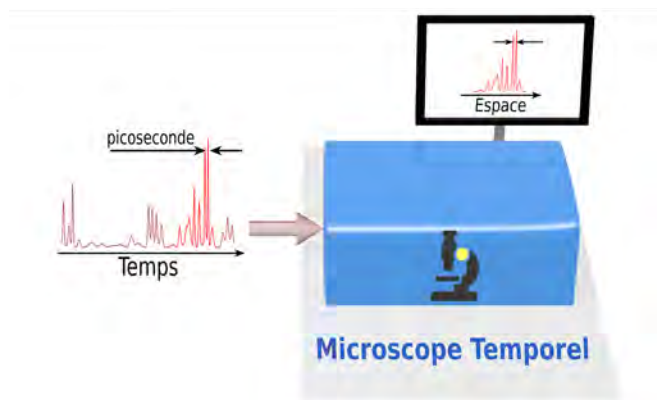
C'est en développant un dispositif original de mesure à des temps ultra-brefs que l'équipe du Laboratoire Physique des lasers, atomes et molécules (PhLAM, CNRS/Univ. Lille 1) a pu mettre en évidence la formation d'impulsions lumineuses géantes à partir de la propagation

de lumière aléatoire dans une fibre optique de 0,5 km. La similitude des caractéristiques de ces impulsions lumineuses avec le soliton de Peregrine, un prototype classique d'onde scélérate, a également été montrée. Ce travail est publié dans la revue *Nature Communications*.

Le dispositif, appelé « microscope temporel », présente des performances remarquables, à savoir une résolution de 250 femtosecondes ainsi qu'une très forte dynamique de 40 dB. Son principe repose sur une interaction non-linéaire entre la lumière au caractère aléatoire et une impulsion laser ultra-courte dont le support temporel a été étiré jusqu'à 25 ps. Cette interaction s'effectue au sein d'un cristal non-linéaire. Le spectre de l'impulsion lumineuse résultant de l'interaction est enregistré par un spectromètre à grande dynamique. Cette technique permet de transformer toute variation temporelle de la lumière à caractériser en une variation d'intensité spectrale de l'impulsion lumineuse résultante, créant ainsi une bijection entre le temps et l'espace. L'analyse statistique des profils lumineux a permis l'observation fréquente de structures sub-picosecondes dont l'intensité instantanée dépassait largement la puissance optique moyenne.

L'observation résolue en temps de ces ondes scélérates ouvre la voie à de nouvelles études fondamentales sur la turbulence optique et sur la propagation non linéaire d'ondes lumineuses partiellement cohérentes.

NB : Au même moment, des chercheurs de l'Institut FEMTO-ST (CNRS/UTBM/UFC/ENSM) à Besançon ont publié récemment une [étude](#) de l'instabilité modulationnelle en utilisant une technique comparable (lentille temporelle).



Le Microscope Temporel transforme les fluctuations temporelles de la lumière en fluctuations spatiales qui sont ensuite observées à l'aide d'une caméra. © PhLAM

### En savoir plus

Single-shot observation of optical rogue waves in integrable turbulence using time microscopy

Pierre Suret, Rebecca El Koussaifi, Alexey Tikan, Clément Evain, Stéphane Randoux, Christophe Szewaj et Serge Bielawski

*Nature Communications* (2016), doi:10.1038/ncomms13136

### Contact chercheur

Pierre Suret, Professeur à l'Université Lille 1 et chercheur au PhLAM

### Informations complémentaires

Physique des lasers, atomes et molécules (PhLAM, CNRS/Univ. Lille 1)



www.cnrs.fr

### Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16  
T 01 44 96 42 53  
inp.com@cnrs.fr  
www.cnrs.fr/inp





# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Un nouveau mécanisme d'instabilité dynamo lorsque la conductivité électrique n'est pas uniforme

Février 2017

Des physiciens viennent de montrer que lorsque la conductivité électrique dans un fluide n'est pas uniforme, l'instabilité dynamo apparaît dans des écoulements bien plus simples que ceux qui étaient considérés jusqu'à présent.

Le champ magnétique des étoiles ou des planètes est dû aux mouvements turbulents et rapides du fluide conducteur qui se trouve en leur sein. Par un mécanisme appelé instabilité dynamo, la géométrie de ces écoulements favorise l'émergence et l'amplification croisée d'un courant électrique et d'un champ magnétique. Jusqu'à présent, les physiciens considéraient que l'apparition de cette instabilité nécessitait que l'écoulement du fluide soit relativement complexe. Des physiciens du Laboratoire de physique statistique de l'ENS (LPS, CNRS/ENS/Univ. Paris Diderot/UPMC) viennent de montrer que cette complexité de l'écoulement n'est en fait requise que lorsque l'on fait l'hypothèse simplificatrice très forte d'une conductivité électrique uniforme dans tout le fluide. En s'affranchissant de cette hypothèse, ils viennent d'identifier un nouveau mécanisme d'induction électromagnétique qui autorise l'instabilité dynamo dans des écoulements bien plus simples que ceux considérés jusqu'à présent. Ils ont notamment exhibé des écoulements plans présentant l'instabilité dynamo, une chose impossible lorsque la conductivité électrique est uniforme. Ce mécanisme pourrait permettre d'expliquer la structure spatiale du champ magnétique des planètes géantes de glace telles que Neptune et Uranus qui ont une forte composante transverse.

Ce travail met en lumière le rôle des variations spatiales de conductivité électrique du fluide et plus précisément de leurs corrélations avec l'écoulement. L'importance de ces corrélations est une question nouvelle qui devrait susciter des travaux ultérieurs de modélisations des intérieurs planétaires et stellaires.

### En savoir plus

*Fluctuations of electrical conductivity: a new source for astrophysical magnetic fields*

F. Pétrélis, A. Alexakis et C. Gissinger

*Physical Review Letters* (2016), doi:10.1103/PhysRevLett.116.161102

### Contact chercheur

François Pétrélis, chargé de recherche au CNRS

### Informations complémentaires

Laboratoire de physique statistique de l'ENS (LPS, CNRS/ENS/Univ. Paris Diderot/UPMC)



**Institut de Physique**  
CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16  
T 01 44 96 42 53  
inp.com@cnrs.fr  
www.cnrs.fr/inp



# Institut de physique

Actualités scientifiques

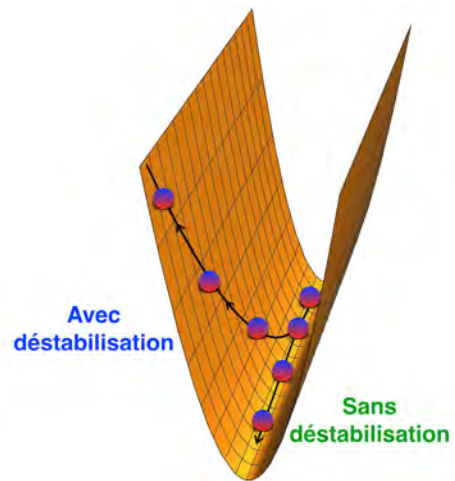
## Un mécanisme de déstabilisation de l'univers primordial

Avril 2017

Des physiciens ont mis à jour un phénomène d'instabilité à l'œuvre dans l'univers primordial qui modifie notre interprétation des observations du fond diffus cosmologique en termes de physique des hautes énergies.

Les observations cosmologiques récentes, en particulier du satellite européen Planck en 2013 et 2015, ont permis de confirmer la théorie de l'inflation cosmologique. Selon celle-ci, les germes des galaxies et des amas de galaxies sont issus de fluctuations quantiques microscopiques étirées par une phase d'expansion accélérée de l'univers il y a plus de 13 milliards d'années. Cependant, les théories de physique des hautes énergies motivent des modèles d'inflation bien plus complexes que les modèles jouets actuellement favorisés par les données.

Dans ce contexte, des physiciens de l'Institut d'Astrophysique de Paris (IAP, CNRS/UPMC) et de l'université de Varsovie (Pologne) ont découvert une instabilité à l'œuvre dans l'univers primordial qui modifie l'interprétation théorique des données du fond diffus cosmologique, et permet de contraindre fortement les scénarios d'inflation issus des modèles de hautes énergies. Ce travail est publié dans la revue *Physical Review Letters*. Les chercheurs ont montré que, de manière générique, la structure complexe des modèles de physique des hautes énergies peut créer une instabilité qui arrête de manière prématurée la phase d'inflation. Ce phénomène jusqu'à présent non pris en compte nécessite de revoir l'ensemble de l'interprétation des données cosmologiques au regard des théories de la physique des hautes énergies comme la supergravité ou la théorie des cordes. Ce travail ouvre donc de nouvelles perspectives sur la compréhension des premiers instants de l'univers en termes de physique théorique fondamentale.



La déstabilisation géométrique identifiée par les chercheurs peut être visualisée comme l'évolution atypique d'une bille évoluant dans un canyon à la vallée en pente douce mais aux parois escarpées. Lorsque les conditions de la déstabilisation géométrique sont réunies, la bille est expulsée hors de la vallée. © IAP (CNRS/UPMC)

### En savoir plus

Geometrical destabilization of inflation

S. Renaux-Petel et K. Turzynski

*Physical Review Letters* (2016), doi:10.1103/PhysRevLett.117.141301

Retrouvez l'article sur la base d'archives ouvertes *arXiv*

### Contact chercheur

Sébastien Renaux-Petel, chargé de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Institut d'astrophysique de Paris (IAP, CNRS/UPMC)

cnrs

www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Comment des troupeaux synthétiques gardent leur cap au travers du désordre

Avril 2017

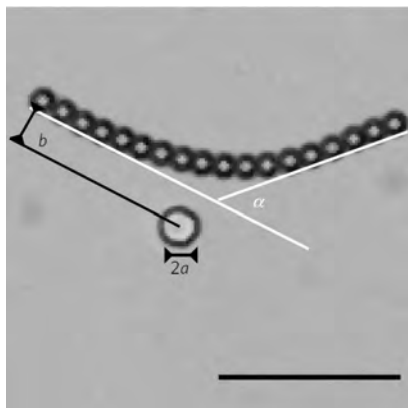
La question du déplacement de troupeaux dans un environnement désordonné se pose non seulement pour les animaux, mais aussi pour des matériaux auto-assemblés à partir d'unités synthétiques motiles. Des physiciens ont montré comment ces liquides actifs forment spontanément un réseau de rivières éparées afin de maintenir leurs écoulements au travers des réseaux d'obstacles.

Il y a plus de vingt ans, des physiciens théoriciens ont proposé de décrire l'organisation en troupeau de créatures vivantes comme on explique l'aimantation spontanée des matériaux magnétiques. Ces cinq dernières années, plusieurs groupes d'expérimentateurs ont suivi un chemin opposé pour créer de nouveaux matériaux dits actifs. A partir d'unités motiles synthétiques qui s'organisent collectivement en de véritables troupeaux, ils ont réalisé des fluides capables de s'écouler spontanément. En interagissant, ces particules motiles s'auto-organisent pour toutes se déplacer dans une même direction. Si l'émergence de tels mouvements collectifs est maintenant comprise en milieu homogène, leur robustesse face au désordre reste une question ouverte à laquelle des physiciens du Laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon (CNRS/ENS Lyon/Univ. Lyon 1) ont répondu pour la première fois. Ils ont caractérisé et expliqué l'impact du désordre sur le transport de ces liquides actifs, montrant ainsi comment ceux-ci forment spontanément un véritable réseau de rivières éparées afin de maintenir leurs écoulements malgré les obstacles. Toutefois, au delà d'une densité d'obstacles précise, toute forme de mouvement collectif

disparaît. Cette transition brutale s'apparente à une transition de phase entre liquide-gaz. Contrairement aux liquides, les particules se déplacent dans un gaz actif sans coordination le long de directions aléatoires, empêchant ainsi toute forme d'écoulement spontané. Ce seuil limite s'apparente à une transition de phase se produisant à l'évaporation d'un liquide standard. Ces travaux ont été publiés dans la revue *Nature Physics*.

Pour réaliser ces liquides synthétiques, les chercheurs ont fabriqué des dizaines de milliers de robots colloïdaux de quelques microns de diamètre qui, immergés dans des huiles, s'avèrent capables de se déplacer spontanément. Les interactions entre ces particules autopropulsées favorisent l'alignement spontané de leur vitesse, le long d'une unique direction moyenne. Les particules ou « rouleur » ont alors une dynamique très proche de celle observées pour des oiseaux dans une nuée, ou des poissons dans un banc. En manipulant ce système unique dans des canaux microfluidiques, ils en ont étudié le mouvement collectif dans des environnements hétérogènes modèles : des réseaux d'obstacles photolithographiés dont le nombre, la forme et la position sont parfaitement contrôlés. A l'approche d'un obstacle, chaque « rouleur » réoriente sa vitesse sans ralentir pour s'en éloigner. L'enjeu était de comprendre et de quantifier la confrontation entre les différentes interactions antagonistes ; à savoir l'alignement entre rouleurs, qui permet l'écoulement spontané du liquide d'une part, et les collisions avec les obstacles incompatibles avec ce mouvement collectif unidirectionnel d'autre part.

Cette compréhension des mécanismes qui régissent les mouvements collectifs dans un environnement désordonné est une avancée importante dans la compréhension des phénomènes de transport en physique de la matière active.



Rouleur colloïdal d'une taille d'environ 10 micromètres, devant un obstacle. © Laboratoire de physique de l'ENS Lyon

### En savoir plus

[Distortion and destruction of colloidal flocks in disordered environments](#)

A. Morin, N. Desreumaux, J.B. Caussin et D. Bartolo

*Nature Physics* (2016), doi:10.1038/nphys3903

Retrouvez l'article sur la base d'archives ouvertes [ArXiv](#)

### Contact chercheur

**Denis Bartolo**, Professeur à l'ENS de Lyon et chercheur au Laboratoire de physique de l'ENS Lyon

### Informations complémentaires

Laboratoire de physique de l'ENS Lyon (CNRS/ENS Lyon/Univ. Lyon 1)

cnrs

www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

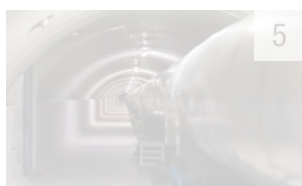
T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp



THÉMATIQUES



SPATIAL - ASTRONOMIE



SONDER LA MATIÈRE



ÉCHELLE NANO & PARTICULES UNIQUES



TRANSITIONS DE PHASE & ORDRE ET DÉSORDRE



GRAINS, FLUIDES ET SOLIDES



PHYSIQUE ET VIVANT



INNOVATION



INTERFACE



### Du grain à la granule : à quelle vitesse croît un agrégat granulaire mouillé ?

Octobre 2017

Des physiciens ont étudié la dynamique de croissance d'agrégats humides produits par l'impact de grains secs. Ce travail a mis en évidence l'importance du liquide aux interfaces avec l'air pour comprendre la cinétique de capture des grains.

Le mélange de grains secs et d'un liquide constitue l'étape préliminaire de procédés industriels tels la granulation de poudres pharmaceutiques, ou la préparation de matériaux de construction (plâtre, mortier). Lorsque le liquide entre en contact avec les grains, il établit entre eux des sortes de ponts (forces capillaires) permettant la formation d'un petit agrégat mouillé sur lequel viennent se coller d'autres grains secs, jusqu'à former des granules ou un matériau humide homogène. Cependant l'interaction entre les grains et le liquide dans de telles situations de mélange est très mal comprise et assez peu maîtrisée, ce qui peut engendrer des préparations non-homogènes, ou des granules aux propriétés finales inadéquates.

Des physiciens du laboratoire Surface du Verre et Interfaces à Aubervilliers ont étudié expérimentalement l'interaction entre un agrégat humide et un jet granulaire sec. Au contact de l'agrégat humide, une partie des grains secs projetés est capturée par le liquide, permettant la croissance de l'agrégat. En combinant des méthodes d'imagerie à différentes échelles (dont la tomographie rayon X et la microscopie), ils ont pu relier la répartition volumique et surfacique du liquide à la vitesse de croissance d'un agrégat modèle. Ces résultats font l'objet d'une publication dans la revue *Physical Review Letters*.

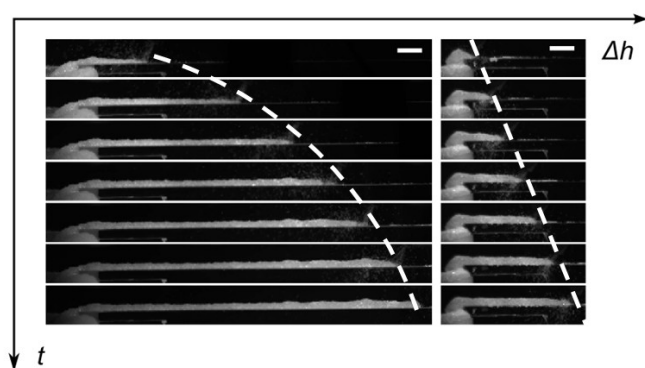
Les chercheurs ont tout d'abord réalisé un support poreux : un empilement de billes de verre sphériques de 0,3 mm de diamètre, connecté à un

réservoir de liquide. En jouant sur la hauteur du support, et donc sur la dépression dans le liquide selon le principe des vases communicants, il est possible de modifier la quantité de liquide disponible à la surface de l'empilement. Plus le réservoir est bas par rapport au support, et moins il y a de liquide disponible au niveau de ce dernier. Des grains de même nature sont ensuite projetés horizontalement sur le support poreux. Un agrégat croît alors au rythme de la capture d'une fraction des grains lancés.

L'agrégat saturé en liquide, d'une dizaine de centimètres, est obtenu en quelques minutes. Les chercheurs ont enregistré sa vitesse de croissance et mis en évidence deux régimes de croissance distincts. Le premier (régime visqueux) est limité par le transport du liquide depuis le support poreux jusqu'à l'extrémité de l'agrégat : lorsque l'agrégat devient trop grand, le liquide ne parvient plus à se glisser rapidement jusqu'à la surface et la croissance ralentit. Le second est limité par la capture des grains (régime de capture). Dans ce cas, les ménisques formés par le liquide entre les grains sont trop courbés, enfoncés et difficile d'accès. Les grains suivant ne peuvent donc plus se coller à la granule.

Le passage d'un régime à l'autre est contrôlé par la disponibilité du liquide à l'interface liquide/air pour agréger les grains. Elle résulte de l'équilibre entre : d'un côté la dépression capillaire des ménisques entre les grains, et de l'autre côté la dépression imposée dans le fluide. Le régime visqueux est observé pour une faible dépression, le régime de capture pour de forte dépression. Les chercheurs ont pu modéliser ce comportement et prévoir exactement la transition d'un régime dynamique à l'autre en considérant le déplacement du fluide d'une part, et la probabilité de capturer un grain d'autre part.

Ces découvertes contribueront à l'optimisation des procédés industriels de mélange qui requièrent d'associer efficacité et rapidité, mais également à la modélisation de phénomènes géophysiques tel le transport éolien sur les sols humides.



Evolution temporelle de l'agrégat sous un jet de grains secs en fonction de la dépression imposée dans le liquide (proportionnelle à  $\Delta h$ ). Cette photo illustre la transition entre le régime visqueux (diffusif à petit  $\Delta h$ ) et le régime de capture (linéaire à grand  $\Delta h$ ).

### En savoir plus

[Accretion dynamics on wet granular materials](#)

Guillaume Saingier, Alban Sauret et Pierre Jop

*Physical Review Letters* (2017), doi:10.1103/PhysRevLett.118.208001

Lire l'article sur la base d'archives ouvertes [HAL](#)

### Contact chercheur

Pierre Jop, chercheur CNRS

### Informations complémentaires

Surface du verre et interfaces (SVI, CNRS/Saint-Gobain)



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Friction solide sur des supports... pas très solides

Décembre 2017

Les lois de la friction solide supposent que les corps en présence sont effectivement solides. En observant des fourmis à la surface de milieux sablonneux, des chercheurs ont posé la question de leur validité dans le cas de milieux partiellement solides.

Le point de départ de cette étude est entomologique. La larve de fourmilion construit un piège en forme d'entonnoir dans les sols sablonneux. Des fourmis qui chutent dans ce piège sont incapables de remonter la pente, et servent de proies à la larve. Cependant, des fourmis légères ou lourdes ont bien plus de chances de s'en échapper que des fourmis de tailles intermédiaires. Pourquoi ? Pour simplifier au maximum ce problème, les chercheurs ont simplement déposé de petits objets à la surface de milieux granulaires inclinés. En fonction de la masse des objets et de l'inclinaison, ils peuvent glisser sans s'arrêter, ou au contraire, s'arrêter après un bref déplacement. Comme attendu, plus la surface est inclinée, plus la tendance à glisser est importante. Mais cette tendance dépend

de la pression appliquée par l'objet sur son support. La force de friction ne suit donc pas la loi d'Amontons-Coulomb, qui stipule que le coefficient de friction est indépendant de la pression.

Un milieu granulaire n'est pas un solide usuel : dès lors que des efforts mécaniques lui sont appliqués, il a tendance à s'écouler. Si l'objet déposé est très léger, le milieu n'est pas déstabilisé. S'il est un peu plus lourd, le matériau granulaire se fluidifie sous son poids. L'objet ne repose alors plus sur un solide, mais sur un matériau partiellement fluide. Cette zone fluidifiée se comporte donc comme un lubrifiant, réduisant ainsi la friction. Si l'objet déposé est encore plus lourd, les déformations des matériaux granulaires deviennent très importantes. Il se forme alors des bourrelets de matières devant les objets, ce qui augmente la friction.

Revenons à nos insectes : au fond du piège du fourmilion, s'ils sont très lourds ou très légers, ils arriveront à remonter la pente. Mais s'ils sont dimensionnés de manière à juste fluidifier le sol, sans pouvoir déformer notablement ce dernier, la remontée hors du piège sera impossible, et l'issue fatale. En dehors de ses aspects fondamentaux, la compréhension de la friction à la surface de matériaux déformables trouve ses applications dans les mécanismes de locomotion des animaux ou des robots.



Une punaise (*Pyrrhocoris apterus*) gravissant une pente de matériau granulaire. Les empreintes laissées permettent à l'insecte de remonter la pente. Photographie T.Steinmann/A. Verbe.

## En savoir plus

**Pressure dependent friction on granular slopes close to avalanche**

J. Crassous, A. Humeau, S. Boury et J. Casas

*Physical Review Letters* (2017), doi:10.1103/PhysRevLett.119.058003

Lire l'article sur la base d'archives ouvertes [ArXiv](#)

## Contact chercheur

**Jérôme Crassous**, enseignant-chercheur à l'Université Rennes 1

**Jérôme Casas**, enseignant-chercheur à l'Université de Tours

## Informations complémentaires

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

**Institut de recherche sur la biologie de l'insecte** (IRBI, CNRS/Univ. Tours)

cnrs

www.cnrs.fr

**Institut de Physique**

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16  
T 01 44 96 42 53  
inp.com@cnrs.fr  
www.cnrs.fr/inp



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Pourquoi la chantilly retombe-t-elle ?

Décembre 2017

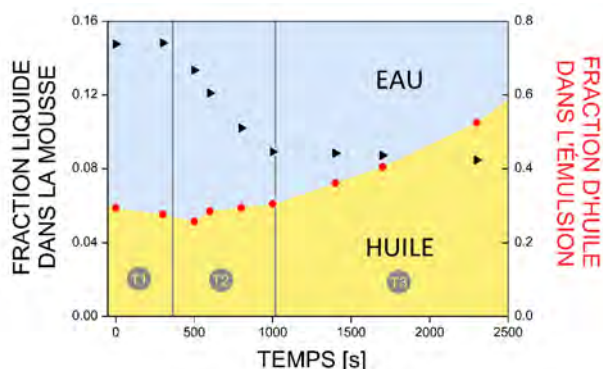
La crème Chantilly ou la mousse de bitume sont deux exemples de mousses complexes, des mousses d'émulsion, qui ne sont pas stables au cours du temps. Dans ces systèmes, à la fois la mousse et l'émulsion sont susceptibles de vieillir. L'évolution couplée, au cours du temps, a été caractérisée par une équipe du Laboratoire de physique des solides (CNRS, Université Paris-Sud, Université Paris-Saclay). Leurs travaux ont été publiés dans la revue *Soft Matter*.

Les ingrédients d'une mousse d'émulsion mêlent ceux de l'émulsion, typiquement des gouttes d'huile dispersées dans de l'eau, et ceux de la mousse, typiquement des bulles de gaz entourées de liquide. Dans les deux cas (émulsion et mousse), il y a un autre élément essentiel qui est le produit tensioactif, qui sépare les deux phases et régit la formation des gouttes ou des bulles. Ni une mousse, ni une émulsion ne sont stables au cours du temps et sous l'effet de la gravité, il y a un mouvement de la phase la plus lourde (l'eau de l'émulsion ou le liquide de la mousse) vers le bas. La crème Chantilly est une mousse d'émulsion car la crème (fraîche) est une émulsion et la crème Chantilly est obtenue en injectant du gaz dans de la crème, par exemple avec un siphon. Il est bien connu qu'elle est instable et tend à retomber : sous l'effet de la gravité, la crème, plus dense que le gaz des bulles, coule (drainage), mais également, au sein de la crème les gouttes d'huile, moins denses que l'eau, ne demandent qu'à remonter (écrémage). La compréhension d'un tel système commence donc par l'étude de l'évolution couplée de la mousse et de l'émulsion et c'est pour pallier le manque de modèles décrivant ce type d'évolution couplée que des chercheurs du Laboratoire de physique des solides ont étudié des mousses d'émulsion modèles.

Ces mousses modèles sont fabriquées à partir d'huile de colza et d'eau avec un tensioactif. Ces systèmes comportent donc trois phases fluides réparties dans d'une part la fraction gazeuse de la mousse (fluide 1) et

d'autre part la fraction liquide de la mousse qui comprend l'eau avec le tensioactif (fluide 2) et les gouttes d'huile (fluide 3). Les proportions relatives de ces trois fluides sont obtenues en combinant de l'analyse d'images en surface des mousses et des mesures de conductivité et leur évolution a été suivie pour des mousses préparées à partir des émulsions à différentes fractions d'huile (mousses plus ou moins grasses). Trois étapes ont été mises en évidence (Figure 2). La première étape (T1) correspond à la stabilisation de la mousse avec un fort réarrangement des bulles et un drainage rapide de l'émulsion de façon homogène. La deuxième étape (T2) correspond à un drainage lent avec augmentation de la taille des bulles et diminution de la fraction liquide de la mousse. Le temps caractéristique de ce drainage varie fortement avec la fraction d'huile : plus la mousse est grasse, plus ce temps est grand car les émulsions plus grasses sont plus visqueuses et coulent plus lentement dans les canaux de la mousse. Le drainage ralentit et finit par cesser en raison des propriétés rhéologiques particulières des émulsions : leur viscosité diminue lorsqu'elles sont soumises au cisaillement. Ici le ralentissement du liquide diminue le cisaillement et provoque l'augmentation de la viscosité, jusqu'à l'arrêt. Dans la troisième étape (T3), le drainage est stoppé et laisse place à l'écémage : la fraction liquide est stabilisée alors que la fraction d'huile augmente. Enfin, la mousse s'effondre sous l'effet de la pression des gouttes d'huile qui arrivent à percer les parois liquides des bulles.

Ces travaux novateurs ont permis de discriminer pour chacune de ces trois étapes quels sont les paramètres permettant d'avoir une mousse d'émulsion la plus stable possible. Si l'on revient à la crème Chantilly, on comprend qu'il faille préférer une crème fraîche grasse et visqueuse : l'écoulement est ralenti et la dernière étape de déstabilisation retardée. De telles études permettront à l'avenir de quantifier l'évolution des fractions des trois fluides et ainsi de mieux comprendre le vieillissement des mousses d'émulsion dans différents domaines (produits alimentaires, cosmétiques, matériaux ...) où ce type de matériau est essentiel car il permet de stabiliser des mousses à base d'huile et est de plus en plus utilisé.



Résultats obtenus pour une mousse d'émulsion modèle contenant initialement 30% de matière grasse de manière homogène. Les triangles noirs représentent l'évolution de la fraction liquide dans la mousse tandis que les points rouges représentent l'évolution de la fraction d'huile dans l'émulsion.

## En savoir plus

Foamed emulsion drainage: flow and trapping of drops

M. Schneider, Z. Zou, D. Langevin et A. Salonen

*Soft Matter* (2017), doi: 10.1039/C7SM00506G

## Contact chercheur

Anniina Salonen, enseignant-chercheur à l'Université Paris-Sud et au LPS

## Informations complémentaires

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



www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp





# Institut de physique

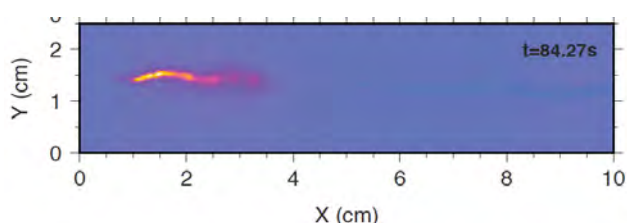
Actualités scientifiques

## Ça chauffe dans les fractures !

Mars 2017

En analysant expérimentalement et théoriquement l'avancée d'une déchirure dans une feuille de papier, des physiciens viennent pour la première fois d'effectuer un bilan d'énergie complet des phénomènes mis en jeu. Ils ont notamment déterminé la proportion de l'énergie mécanique de fracture transformée en chaleur, de l'ordre d'une douzaine de pour cent.

Lorsqu'un solide rompt, une partie de l'énergie libérée est convertie en chaleur à l'endroit de la fissure. Cela conduit à un échauffement qui est parfois assez important pour diminuer la résistance du matériau et faciliter sa rupture. En étudiant la déchirure lente d'une feuille de papier, des physiciens de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS, CNRS/Univ. Strasbourg), du Laboratoire de Physique de l'ENS Lyon (CNRS/ENS Lyon/Univ. Lyon 1) et de l'Université d'Oslo, ont réalisé pour la première fois un bilan énergétique précis de la propagation de fracture, à partir de l'estimation claire des différentes sources de dissipation d'énergie et de la conversion de l'énergie mécanique en chaleur. En combinant calculs analytiques, simulations numériques et expériences de laboratoire, les chercheurs ont relié le champ de température relevé à la pointe d'une fissure à la fraction d'énergie mécanique transformée en chaleur lors de la propagation de cette fissure. Grâce à une caméra infrarouge, ils ont mesuré cette fraction, d'environ 12 % pour les fissures lentes, mais pouvant atteindre 40 % lors d'avalanches. Ces travaux démontrent également que l'accumulation de chaleur auto-générée lors de la déformation et de la rupture des échantillons de papier pourrait déclencher la combustion de microfibrilles en pointe de fissure. Cela expliquerait ainsi la transition vers un régime de rupture dynamique, avec des vitesses de fracture importantes observées expérimentalement. Ce travail est publié dans la revue *Soft Matter*.



Champ de température lors de la propagation d'une fissure dans une feuille de papier.

### En savoir plus

[How cracks are hot and cool: a burning issue for paper](#)

Renaud Toussaint, Olivier Lengliné, Stéphane Santucci, Tom Vincent-Dospital, Muriel Naert-Guillot et Knut Jørgen Måløy

*Soft Matter* (2016), DOI: 10.1039/C6SM00615A

### Contacts chercheurs

Stéphane Santucci, CNRS

Renaud Toussaint, IPGS

Knut Jørgen Måløy, Université d'Oslo

### Informations complémentaires

Laboratoire de Physique de l'ENS Lyon (CNRS/ENS Lyon/Univ. Lyon 1)

Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS, CNRS/Univ. Strasbourg)

Département de physique de l'Université d'Oslo



[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

[inp.com@cnrs.fr](mailto:inp.com@cnrs.fr)

[www.cnrs.fr/inp](http://www.cnrs.fr/inp)



### Des nanobâtonnets comme sondes ultimes de l'écoulement de fluides

Octobre 2017

Grâce à la synthèse de nanobâtonnets de phosphate de lanthane, des chercheurs sont parvenus à cartographier expérimentalement l'écoulement d'un fluide dans des canaux de très petite taille.

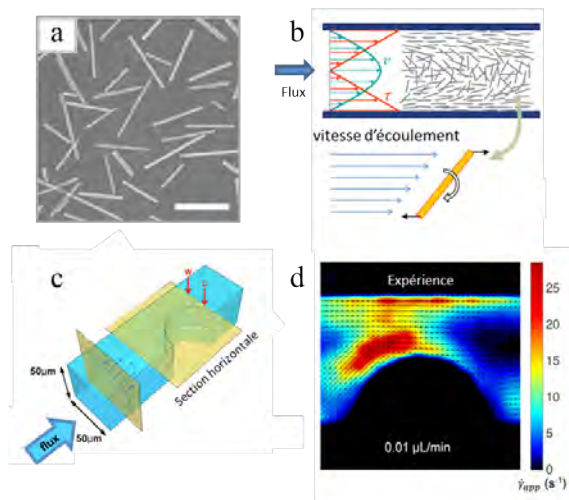
Comment s'écoule un fluide dans un réseau capillaire plus ou moins complexe ? Cette question est à la base de nombreuses études, comme celles sur la circulation dans les vaisseaux sanguins afin de comprendre, par exemple, l'accumulation contre les parois de matières lipidiques à l'origine de l'athérosclérose. En parallèle de simulations d'hydrodynamiques toujours plus performantes, les études expérimentales se heurtent à la difficulté de caractériser des écoulements à toute petite échelle, de l'ordre de quelques centaines de nanomètres.

Une équipe de chercheurs a synthétisé des nanocristaux de phosphate de lanthane ( $\text{LaPO}_4$ ) ayant la forme de bâtonnets de 10 nm de diamètre et 200 nm de longueur. Ils ont montré que ces petits bâtonnets s'alignent sous l'effet des forces de cisaillement qui accompagnent l'écoulement du fluide dans lequel ils sont dispersés ; un peu comme des bûches flottant sur une rivière finissent par s'orienter dans le sens du courant. De plus, l'insertion d'ions luminescents comme l'europlum ( $\text{Eu}^{3+}$ ) dans ces nanocristaux confère aux bâtonnets des propriétés d'émission

de lumière fortement polarisée. Autrement dit, la forme du spectre d'émission observé dépend de l'orientation du bâtonnet. Dans ces conditions, une mesure simple de la lumière émise par ces bâtonnets permet de retrouver assez directement leur orientation spatiale.

Partant de ces deux effets – l'alignement des bâtonnets dans un écoulement et la possibilité de déterminer leur orientation par observation au microscope – l'idée développée dans cet article consiste à utiliser ces bâtonnets pour analyser, en temps réel et avec une résolution inégalée, l'écoulement d'un fluide dans un canal fluidique de taille micrométrique. Ce travail ouvre des perspectives prometteuses pour la compréhension fondamentale de phénomènes liés aux écoulements d'un fluide dans des canaux complexes. Au-delà, ces sondes d'orientation pourraient également être utilisées en biologie, pour suivre in-situ les mécanismes liés à la dynamique d'orientation de bio-macromolécules, par exemple des protéines comme la myosine, afin d'en expliquer les propriétés et leurs modes d'action.

Ce travail particulièrement pluridisciplinaire publié dans la revue *Nature Nanotechnology* a mobilisé les compétences des chercheurs de différentes communautés en chimie et physique des matériaux, en spectroscopie et microscopie optique et en hydrodynamique, dans le cadre d'une collaboration internationale franco-néerlandaise impliquant le Laboratoire de physique de la matière condensée et le Laboratoire d'hydrodynamique (CNRS, Ecole Polytechnique, Université Paris-Saclay) et l'Institut Van't Hoff pour les Sciences Moléculaires (Université d'Amsterdam).



a : image de microscopie électronique à balayage des nanobâtonnets de  $\text{LaPO}_4$   
b : schéma montrant l'alignement des nanobâtonnets dans un écoulement sous l'effet des forces de cisaillement  
c : Schéma d'un canal microfluidique ayant été étudiée  
d : cartographie du champ de cisaillement dans le fluide en écoulement

### En savoir plus

Monitoring the orientation of rare-earth doped nanorods for flow shear tomography

JW Kim, S. Michelin, M. Hilbers, L. Martinelli, E. Chaudan, G. Amselem, E. Fradet, J.-P. Boilot, A.M. Brouwer, C. N. Baroud, J. Peretti et T. Gacoin

*Nature Nanotechnology* (2017), doi:10.1038/nnano.2017.111

### Contact chercheur

Thierry Gacoin, directeur de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Laboratoire de physique de la matière condensée (LPMC, CNRS/X)



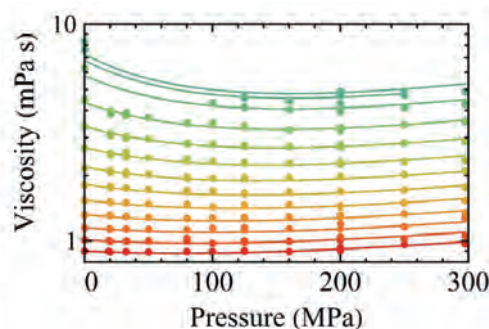
### L'eau surfondue s'écoule deux fois plus vite à forte densité

Septembre 2017

Alors qu'habituellement une augmentation de pression augmente les effets de viscosité et ralentit les écoulements, c'est l'effet inverse qui se produit dans l'eau. Des physiciens ont montré que cette anomalie, peu marquée à température ambiante, devient spectaculaire dans l'eau surfondue, c'est-à-dire restant liquide sous son point de fusion.

Quiconque se déplace pendant les heures de pointe sait que, plus dense est la foule, plus lent est le mouvement. Les liquides suivent cette loi, sauf l'eau froide : une augmentation de pression rend l'eau plus dense, mais diminue sa viscosité ! Ceci témoigne de l'effondrement progressif du réseau des liaisons hydrogène dans l'eau, responsable de nombreuses anomalies de ce liquide. Comme le réseau des liaisons hydrogène se développe lorsqu'on refroidit l'eau, on s'attend à un effet encore plus marqué de la pression sur la viscosité pour l'eau liquide surfondue. L'eau liquide surfondue est de l'eau qui demeure liquide à une température inférieure au point de fusion de la glace, comme par exemple les gouttes d'une pluie verglaçante. La connaissance des propriétés de l'eau surfondue est importante pour départager différentes théories de la structure de l'eau. Cependant, l'eau surfondue peut cristalliser à tout moment, ce qui rend toute mesure particulièrement délicate. C'est sans doute pour cela qu'aucune donnée de viscosité n'était jusqu'ici disponible dans ces conditions extrêmes.

Des physiciens de l'Institut Lumière Matière (Lyon) sont parvenus à mesurer la viscosité de l'eau pour des températures descendant jusqu'à  $-29\text{ °C}$  et des pressions montant jusqu'à 3000 atmosphères, révélant que la pression peut réduire la viscosité de près de moitié !



Viscosité mesurée en fonction de la pression à différentes températures (de plus en plus froides de bas en haut). Le modèle (traits pleins) reproduit bien les données (points), en particulier les minima en pression.



Plus on est, mieux ça coule ! © NMFS/Southwest Fisheries Science Center

Pour cela, les auteurs ont construit un viscosimètre à temps de vol. De l'eau pure s'écoule le long d'un tuyau en verre de diamètre  $1/100^{\text{e}}$  de millimètre. Une solution très diluée de soude est ajoutée, ce qui change la conductivité du liquide et permet de détecter l'avancée de la soude dans le tuyau grâce à deux électrodes. Connaissant la distance entre électrodes et la différence de pression entre les extrémités du tuyau, la mesure du temps de parcours donne accès à la viscosité. Les auteurs ont ainsi réussi à mesurer l'écoulement d'eau liquide jusqu'à  $19\text{ °C}$  au-dessous du point de fusion de la glace. Ce travail est publié dans la revue *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS). Les auteurs proposent également l'extension d'un modèle qui traite l'eau comme un mélange de deux espèces dont la proportion varie en fonction de la température et de la pression. Le nouveau modèle reproduit quantitativement les propriétés thermodynamiques et dynamiques de l'eau et fournit une explication simple et unificatrice de ses anomalies.

### En savoir plus

[Pressure dependence of viscosity in supercooled water and a unified approach for thermodynamic and dynamic anomalies of water](#)

L. P. Singh, B. Issenmann et F. Caupin

*PNAS* (2017), doi:10.1073/pnas.1619501114

### Contact chercheur

Frédéric Caupin, Professeur à l'Université Lyon 1

### Informations complémentaires

Institut Lumière Matière (ILM, CNRS/Univ. Lyon 1)



### Les propriétés électromécaniques de gels fortement conducteurs se dévoilent enfin

Mars 2017

Les fluides complexes, tels ceux utilisés dans les batteries automobiles par exemple, possèdent des propriétés électromécaniques intermédiaires entre celles des solides et des liquides. Grâce à un dispositif métrologique original, des physiciens ont réalisé pour la première fois des mesures simultanées de l'élasticité et la conductivité électrique de ces fluides fortement conducteurs, au repos comme sous écoulement. Ce dispositif sensible a notamment permis de mettre en évidence des réarrangements de la microstructure du matériau sous de faibles déformations macroscopiques.

Les fluides complexes fortement conducteurs font l'objet de nombreuses applications, notamment dans le stockage de l'énergie. De fait, les physiciens cherchent à mesurer et à contrôler les propriétés mécaniques et électriques de ces matériaux mous, au repos et sous écoulement. Parallèlement aux techniques d'imagerie et de diffusion de rayonnement usuelles, quelques équipes dans le monde ont développé des dispositifs permettant de sonder la microstructure du fluide. Ces dispositifs allient des mesures de conductivité électrique, qui renseignent sur l'évolution de cette microstructure, et des mesures de propriétés mécaniques. Jusqu'à présent, de telles mesures n'ont été effectuées qu'avec des dispositifs permettant l'étude de fluides complexes faiblement conducteurs.

Pour la première fois, une équipe de physiciens du CNRS et du MIT relevant de l'unité mixte de recherche Multi-Scale Materials Science for Energy and Environment (MSE<sup>2</sup>), a réussi à mesurer simultanément les propriétés électromécaniques de gels fortement conducteurs. Ceux-ci sont formés de microparticules conductrices en suspension dans un fluide visqueux. Pour cela, ils ont développé une cellule de mesure rhéo-électrique inédite qui minimise

la friction mécanique lors de la mesure de conductivité. Les physiciens ont ainsi caractérisé quantitativement le lien entre l'élasticité et la structure de ce matériau modèle. En préparant des gels au repos *via* différentes histoires mécaniques, les chercheurs ont montré qu'élasticité et conductivité sont liées par une loi de puissance, dont l'exposant est caractéristique de la nature des microparticules en suspension dans le fluide. En outre, en explorant un régime de faibles déformations, ils ont détecté des réarrangements dans la microstructure du gel. Enfin, dans la limite des grandes déformations, ils ont caractérisé les propriétés rhéo-électriques de nombreux gels en écoulement stationnaire, démontrant la gamme d'applications possibles de cette cellule. Ces résultats sont publiés dans la revue *Physical Review Applied*.

Le dispositif rhéo-électrique se compose de deux plans conducteurs mobiles couverts d'une fine pellicule d'or entre lesquels est positionné l'échantillon. Du Gallium, un métal liquide à température ambiante, permet d'assurer la circulation du courant à travers la cellule. L'échantillon est sollicité mécaniquement *via* le plan supérieur qui peut tourner sur lui-même. Les mesures ont été conduites sur des gels de noir de carbone, qui sont constitués de microparticules de suie en suspension dans une huile minérale. Les microparticules sont attractives et forment au repos un réseau aux propriétés élastiques, qui peut être détruit sous l'effet d'une contrainte extérieure, avant de se reformer à nouveau lorsque le système ne subit aucune perturbation mécanique. La sensibilité du dispositif expérimental a permis de suivre les réarrangements de la microstructure au sein du gel, notamment lors de l'application d'une contrainte constante. Les premiers réarrangements associés se produisent pour de faibles déformations macroscopiques, ce qui les rend difficilement détectables par les outils de vélocimétrie classiques. Grâce à sa sensibilité, ce nouveau dispositif rhéo-électrique constitue une excellente sonde pour l'étude des précurseurs à la rupture des gels. Il ouvre ainsi la voie à l'étude de la « fatigue » des matériaux mous conducteurs, paramètre essentiel pour la conception des composants des batteries du futur.

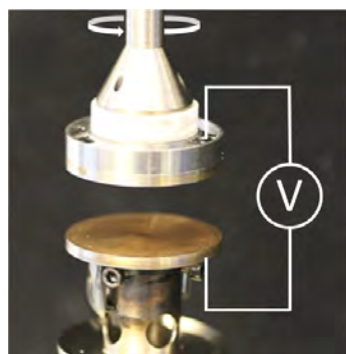


Photo du dispositif expérimental. L'échantillon est inséré entre deux plans recouverts d'une fine pellicule d'or. Le plan supérieur, qui sollicite le fluide mécaniquement, est connecté à un rhéomètre commercial. Un métal liquide à température ambiante est placé sur le plan supérieur. Il assure un contact électrique à moindre friction permettant de fermer le circuit électrique. © Ahmed Helal - MIT

### En savoir plus

[Simultaneous Rheoelectric Measurements of Strongly Conductive Complex Fluids](#)

Ahmed Helal, Thibaut Divoux et Gareth H. McKinley

*Physical Review Applied* (2016), DOI: 10.1103/PhysRevApplied.6.064004

### Contact chercheur

Thibaut Divoux, chargé de recherche au CNRS

### Informations complémentaires

MultiScale Material Science for Energy and Environment (MSE<sup>2</sup>, MIT/CNRS)

Centre de Recherche Paul Pascal (CRPP, CNRS)

Massachusetts Institute of Technology



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Vers des matériaux à grains nanométriques à très haute résistance mécanique

Août 2017

Des chercheurs ont mis en évidence le rôle de la chimie locale des joints de grains sur le comportement mécanique d'alliages métalliques nanocristallins. Ces résultats, publiés dans la revue *Science*, offrent de nouvelles perspectives pour la conception de matériaux à très haute résistance mécanique.

Les alliages métalliques sont généralement polycristallins, c'est-à-dire formés de grains cristallins dont la taille peut être millimétrique, micrométrique ou nanométrique. Les interfaces entre ces grains – ou joints de grain – jouent, avec les défauts d'empilement cristallin tels que les dislocations, un rôle important dans les propriétés mécaniques de ces alliages. Par exemple, leur résistance mécanique est le plus souvent proportionnelle à l'inverse de la racine carrée de la taille des grains. C'est la loi de Hall et Petch qui rend compte du lien entre la contrainte nécessaire au mouvement des dislocations – permettant la déformation du matériau – et la taille de grains : plus ces derniers sont petits, plus il y a d'obstacles au mouvement des dislocations et plus la contrainte à fournir est importante. Ainsi, on observe généralement un accroissement important de la résistance mécanique lorsque la taille de grains est réduite jusqu'à des

dimensions de l'ordre d'une dizaine de nanomètres. Pour des tailles encore plus petites, d'autres mécanismes entrent en jeu pouvant conduire au contraire à une diminution de la résistance mécanique. Ces mécanismes mettent cette fois-ci en œuvre les joints de grain eux-mêmes, comme par exemple leur mobilité (migration, rotation, glissement...). L'étude présentée ici montre que ces mécanismes alternatifs sont fortement affectés par la chimie locale des joints de grains et que ce phénomène peut être exploité pour contrôler la résistance des alliages métalliques nanocristallins.

L'étude a été réalisée par l'équipe du professeur Ke Lu du Shenyang National Laboratory for Materials Science (Chine) en collaboration avec le Groupe de Physique des Matériaux (GPM, CNRS/Univ. Rouen Normandie/INSA Rouen). Des alliages modèle Ni-Mo (nickel-molybdène) avec des tailles de grains comprises entre 5 et 30 nanomètres ont été étudiés et un accroissement significatif de la résistance mécanique (de 5 à 11 GPa) a été mis en évidence après traitement thermique. Grâce à la sonde atomique tomographique développée au GPM, les chercheurs ont pu quantifier et localiser les modifications de la composition chimique au sein du matériau et montrer un enrichissement en molybdène au niveau des joints de grains.

Ces travaux apportent un regard nouveau sur les mécanismes conduisant aux limites de la loi de Hall et Petch pour des tailles de grains nanométriques. Par ailleurs, ils offrent de nouvelles perspectives pour la conception de matériaux à très haute résistance mécanique grâce au contrôle de la chimie locale des joints de grains.

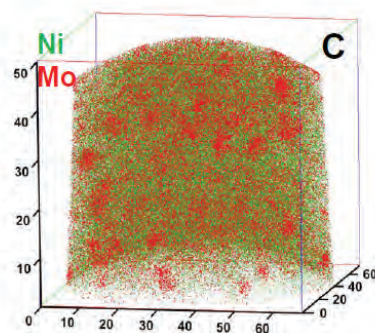


Image tridimensionnelle (nm) obtenue par sonde atomique tomographique de la distribution de nickel (Ni) et de molybdène (Mo) d'un alliage Ni-14.2 % Mo montrant la ségrégation du molybdène (en rouge) au niveau des joints de grains apparue après chauffage à 500 °C.

### En savoir plus

Grain boundary stability governs hardening and softening in extremely fine nanograined metals

J. Hu, Y. N. Shi, X. Sauvage, G. Sha et K. Lu

*Science* (2017), doi:10.1126/science.aal5166

### Contact chercheur

Xavier Sauvage, directeur de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Groupe de physique des matériaux (GPM, CNRS/INSA Rouen/Univ. Rouen Normandie)

cnrs

www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

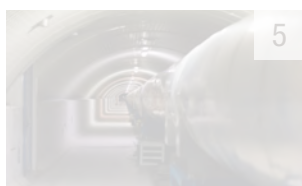
inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp

Illustration du bandeau : © Emmanuel Perrin/CNRS Photothèque



THÉMATIQUES



SPATIAL - ASTRONOMIE



SONDER LA MATIÈRE



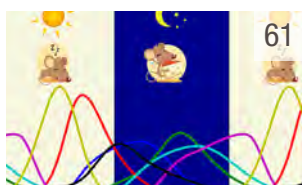
ÉCHELLE NANO & PARTICULES UNIQUES



TRANSITIONS DE PHASE & ORDRE ET DÉSORDRE



GRAINS, FLUIDES ET SOLIDES



PHYSIQUE ET VIVANT



INNOVATION



INTERFACE



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Tumeurs sous pression

Juin 2017

En collaboration avec des biologistes, des physiciens ont expliqué pour la première fois le processus de propagation du stress au sein d'une tumeur cancéreuse modèle en utilisant des microbilles de gel comme capteurs de stress.

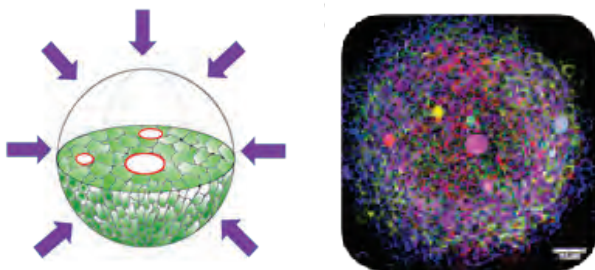
L'intérieur d'une tumeur est souvent sous pression, ce qui empêche l'établissement d'un flux sanguin régulier. Le manque de nutriment et d'oxygène qui en suit ralentit peut-être le développement de la tumeur, mais limite aussi la pénétration des médicaments chimiothérapeutiques au cœur de la lésion. La cause de cette surpression est probablement à chercher dans le support contractile qui entoure et écrase la tumeur. Mais pourquoi ce stress mécanique n'est-il pas encaissé par la voute des cellules périphériques ? Pourquoi, au contraire, est-il aussi important au cœur de la tumeur ?

Pour répondre à cette question, une équipe pluridisciplinaire de chercheurs du Laboratoire interdisciplinaire de physique (LIPhy, CNRS/Univ. Grenoble Alpes) a développé des micro-capteurs de pression, qu'elle a incorporée à un agrégat sphérique de cellules tumorales en croissance, un système modèle de tumeur *in-vitro*. Ces capteurs sont constitués de microbilles en hydrogel, qui se dégonflent comme des éponges sous la pression

mécanique. Leur taille typique d'une vingtaine de micromètre, leurs propriétés mécaniques et leur état de surface sont proches de ceux des cellules. Ces propriétés sont bien définies et reproductibles. Par diverses techniques de microscopie en 3D, les chercheurs ont suivi l'organisation et l'évolution des micro-capteurs vectorisés, sous l'effet d'une pression mécanique appliquée de l'extérieur sur la tumeur. En mesurant les changements de volume de ces micro-capteurs, ils ont pu suivre l'évolution du stress dans la tumeur.

Les physiciens ont ainsi mis en évidence une propagation anormale du stress mécanique, avec une augmentation progressive de celui-ci au centre de la tumeur. Cet effet, peu commun dans les matériaux passifs, s'explique par un arrangement anisotrope des cellules en division: allongées tangentiellement, les couches cellulaires extérieures n'écrantent plus la pression mais la transmettent, amplifiée, aux couches subjacentes. Ce phénomène d'amplification de la pression expliquerait de manière simple la réduction de prolifération au centre d'une tumeur et l'apparition d'un cœur nécrotique.

Cette technique représente la première méthode non destructive de suivi du stress à l'intérieur d'un agrégat de cellules. En adaptant le ligand fonctionnalisé à la microbille et les propriétés mécaniques de ces billes, un grand nombre d'applications au-delà de l'oncologie sont envisageables dans le domaine de la biologie *in vitro*, comme l'évaluation de la pression isotropique locale dans un embryon.



A gauche : vue schématique d'un agrégat de cellules cancéreuses (vert) avec microcapteurs de pression (en blanc). A droite : coupe confocale de l'agrégat, avec les microcapteurs (sphères) de différentes tailles. © LIPhy

## En savoir plus

[Cell-like pressure sensors reveal increase of mechanical stress towards the core of multicellular spheroids under compression](#)

M.E. Dolega, M. Delarue, F. Ingremeau, J. Prost, A. Delon et G. Cappello

*Nature Communications* (2016), doi:10.1038/ncomms14056

Retrouvez l'article sur les bases d'archives ouvertes [HAL](#)

## Contact chercheur

Monika Dolega, post-doctorante

Giovanni Cappello, directeur de recherche CNRS

## Informations complémentaires

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

cnrs

www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp

Illustration du bandeau : © Emmanuel Perrin/CNRS Photothèque





# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Un modèle mathématique pour comprendre comment l'horloge du foie se synchronise au rythme des repas

Août 2017

Si notre horloge biologique centrale est régulée par l'alternance du jour et de la nuit, d'autres horloges, soumises aux rythmes des échanges énergétiques, jouent un rôle physiologique crucial dans les différents organes. L'horloge du foie, organe régulateur de l'énergie et véritable usine chimique, joue ainsi un rôle prépondérant dans notre métabolisme. En collaboration avec des biologistes, des physiciens ont modélisé mathématiquement cette horloge biologique hépatique et ont testé ce modèle avec succès sur des données expérimentales, ouvrant la voie à des protocoles chronothérapeutiques.

Notre organisme est soumis en permanence à l'alternance des jours pendant lesquels nous sommes actifs et nous nous nourrissons, et des nuits, périodes de repos et de jeûne. Pour gérer en continu ces apports et dépenses d'énergie, et orchestrer notre métabolisme de manière adaptée, notre organisme doit anticiper les variations périodiques liées à cette alternance. Pour cela, nos différents organes sont en permanence informés de la phase du cycle à laquelle ils se trouvent par des horloges internes, qui se synchronisent en partie sur l'horloge centrale, alignée sur le cycle jour/nuit, mais principalement sur les rythmes de prise de nourriture ou d'effort. C'est en particulier le cas du foie, organe métabolique majeur qui

régule notamment la glycémie. Lorsque l'horloge hépatique est perturbée, des désordres métaboliques sévères tels que l'obésité ou le diabète de type 2 peuvent survenir.

Afin de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans ces dysfonctionnements, une collaboration entre des biologistes de l'Unité Récepteurs Nucléaires, maladies cardio-vasculaires et diabète (Institut Pasteur de Lille/INSERM/Univ. Lille 2) et des physiciens du Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes, Molécules (PhLAM, CNRS/Lille 1) a permis de concevoir le premier modèle mathématique décrivant la synchronisation de l'horloge hépatique par les variations cycliques de l'état énergétique des cellules. Ces travaux sont publiés dans la revue *Cell reports*. Les chercheurs ont généralisé des modèles mathématiques déjà existants en y incorporant des senseurs métaboliques importants, qui influent sur l'horloge en fonction de l'état énergétique de la cellule. Ce modèle mathématique décrit la dynamique de l'horloge au moyen de 16 équations différentielles transcrivant l'évolution temporelle de la concentration de protéines. Ils ont testé puis validé ce modèle sur des données expérimentales de l'horloge hépatique de souris. Ce modèle reproduit aussi les principales perturbations de l'horloge observées lors d'un régime riche en graisse et permet d'identifier les voies de signalisation qui « recalent » cette horloge.

Ces résultats permettent d'espérer que des mécanismes importants menant à la dérégulation de l'horloge pourront être identifiés par l'analyse du modèle mathématique. Un protocole chronothérapeutique pourrait ainsi être proposé pour restaurer un fonctionnement normal de l'horloge lorsque cette dernière est affectée par certaines pathologies métaboliques.



L'alternance des jours et des nuits entraîne chez la plupart des animaux, comme la souris représentée ici, une succession de périodes d'activité, où ils se nourrissent, et de repos, où ils jeûnent (pour la souris, respectivement la nuit et le jour). Le foie, organe de régulation métabolique, anticipe ces variations grâce à une horloge biologique composée de gènes et de protéines en interaction. Les variations temporelles d'activité des principaux gènes de l'horloge hépatique des souris sont représentées ici pour un régime normal, ces oscillations pouvant être perturbées lors d'un stress nutritionnel ou dans une pathologie métabolique.  
© Marc Lefranc/PhLAM

### En savoir plus

[A Mathematical Model of the Liver Circadian Clock Linking Feeding and Fasting Cycles to Clock Function](#)

Aurore Woller, Hélène Duez, Bart Staels et Marc Lefranc

*Cell Reports* (2016), doi:10.1016/j.celrep.2016.09.060

### Contact chercheur

Marc Lefranc, Professeur à l'Université Lille 1 et chercheur au PhLAM

### Informations complémentaires

Laboratoire Physique des lasers, atomes et molécules (PhLAM, CNRS/Univ. Lille 1)



www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Le stress mécanique détermine la forme des virus

Octobre 2017

La forme d'un virus, donnée par sa coque ou capsid, peut être régulière et compacte, à la façon d'un icosaèdre, ou bien irrégulière et allongée, comme un cône. Des chercheurs ont démontré que cette forme dépend d'une propriété intrinsèque des protéines qui constituent la coque : la courbure spontanée.

Les virus biologiques sont constitués essentiellement par un génome et un assemblage spontané de protéines virales, sous la forme de coques fermées appelées capsides dont un des rôles est de protéger le génome du virus. Les formes générales de ces capsides virales sont soit très régulières et compactes, reproduisant alors une forme d'icosaèdre pour un grand nombre de virus, soit plutôt irrégulières et allongées, avec par exemple une forme conique pour le virus associé au SIDA, le virus de l'immunodéficience humaine (VIH-1). (Illustration icosaèdre et cône).

Quelle est la propriété, à l'échelle de la protéine, responsable du choix de la forme globale du virus ? Pour répondre à cette question, une équipe du Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon a modélisé l'énergie mécanique associée à la formation de la capsid virale. Elle a mis en évidence le rôle déterminant de la courbure spontanée, propriété intrinsèque de la surface protéique qui traduit sa tendance à adopter une certaine courbure.

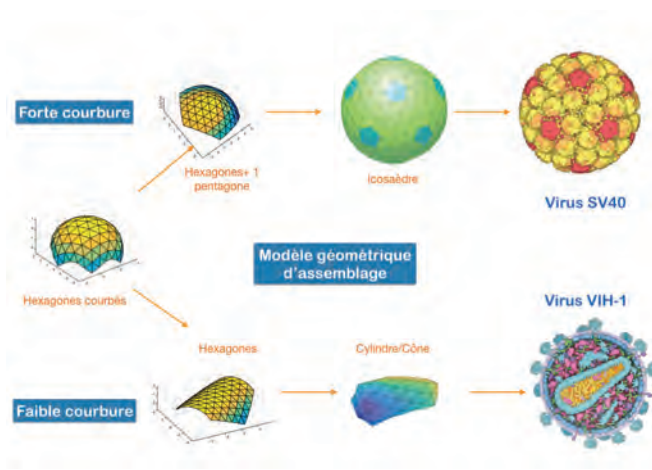
En l'absence de courbure spontanée, les protéines forment localement

des hexagones en s'associant par six au sein d'une surface globalement plane. En revanche, la présence de courbure spontanée va, lors de la croissance initiale de la coque, comprimer les protéines les unes contre les autres créant ainsi un stress mécanique très important. L'équipe de chercheurs de Lyon a montré que ce stress mécanique peut être relaxé de deux manières différentes.

Lorsque la courbure spontanée est forte, certaines protéines vont former localement des pentagones et donc s'assembler par cinq, plutôt que des hexagones, permettant ainsi de courber plus facilement la surface. Cela se comprend bien en modélisant géométriquement une protéine par un triangle équilatéral. Un hexagone formé de six triangles identiques est plan, alors qu'un pentagone formé de cinq triangles identiques forme plutôt un cône, donc une surface courbée. L'inclusion de ces pentagones va ainsi permettre la formation d'un icosaèdre.

En revanche, lorsque la courbure spontanée est faible, les protéines vont s'assembler en cylindre. Au sein de cette géométrie, elles peuvent alors former une surface courbe qui ne les comprime pas. La croissance de la capsid se fera ainsi de façon allongée et cylindrique.

La compréhension de ces mécanismes fondamentaux d'assemblage de virus peut avoir des applications qui dépassent la virologie, comme l'ingénierie de nano-matériaux à base de carbone, pour lesquels les géométries d'assemblage sont similaires : arrangement hexagonal plat pour le graphène, icosaèdres pour les fullerènes, ou encore cylindres pour les nanotubes.



*Schéma reproduisant la croissance de la surface protéique, chaque triangle étant associé à une seule protéine. La surface formée d'hexagones comprime les triangles à la périphérie, produisant un stress mécanique. Ce stress est relaxé par l'inclusion de pentagones, lorsque la courbure est forte, ou par une croissance le long d'un cylindre, lorsque la courbure est faible.*

source des deux images de droite : The Protein Data Bank H.M. Berman, J. Westbrook, Z. Feng, G. Gilliland, T.N. Bhat, H. Weissig, I.N. Shindyalov, P.E. Bourne (2000) *Nucleic Acids Research*, 28: 235-242. doi:10.1093/nar/28.1.235; rcsb.org

## En savoir plus

[Viral self-assembly pathway and mechanical stress relaxation](#)

Martin Castelnovo

*Physical Review E* (2017), doi:10.1103/PhysRevE.95.052405

## Contact chercheur

Martin Castelnovo, chargé de recherche au CNRS

## Informations complémentaires

Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon (CNRS/ENS Lyon/Univ. Lyon 1)



www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp

Illustration du bandeau : © Emmanuel Perrin/CNRS Photothèque



### Quand les contacts entre cellules rendent leur déplacement plus efficace

Octobre 2017

On sait depuis un demi-siècle et les travaux d'Abercrombie (1953) que les contacts entre cellules peuvent inhiber leur migration. En étudiant l'étalement d'une colonie, une équipe de biophysiciens vient de montrer que les contacts peuvent au contraire accélérer leurs déplacements.

Qu'est-ce qui régit le déplacement d'un groupe de cellules ? Cette question reste une préoccupation majeure pour nombre de biophysiciens, biologistes et médecins. L'étalement d'une population cellulaire initialement localisée est crucial pour de nombreux phénomènes allant de la morphogénèse à la dissémination des cellules cancéreuses.

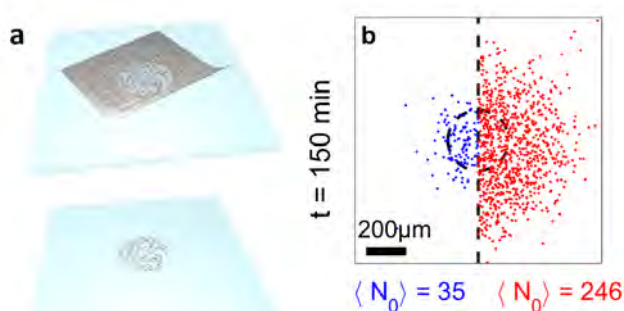
Depuis la découverte d'Abercrombie, un panorama assez complet des mécanismes physiques et moléculaires mis en jeu dans l'inhibition de contact a été mis en lumière. Cependant, cela ne concerne que des populations de cellules très cohésives. Le cas des cellules peu cohésives à moindre densité a été très peu étudié. C'est pourtant celui que l'on retrouve dans la dispersion des cellules métastatiques, dans le déploiement des cellules immunitaires ou encore dans la propagation des microbes.

Des chercheurs de l'Institut Lumière Matière (CNRS, Univ. Lyon 1), se sont penchés sur ce cas. De façon surprenante, ils ont observé que ce sont les colonies les plus denses qui s'étalent le plus rapidement. Ils ont ensuite mis au jour le mécanisme sous-jacent : les contacts transitoires

entre cellules augmentent durablement leur vitesse et l'efficacité de leur déplacement (leur persistance), ce qui, à l'échelle de la population, accélère la dispersion de la colonie. Ces travaux, publiés dans la revue *Nature Physics*, représentent une avancée fondamentale pour la compréhension de la motilité cellulaire. En soulignant l'importance des interactions passées dans l'état interne des cellules, ils soulèvent aussi de nouvelles questions en « matière active », ce champ récent de la physique statistique qui décrit les effets collectifs de particules autopropulsées.

Pour parvenir à ces résultats, les chercheurs ont utilisé un organisme modèle : l'amibe *Dictyostelium Discoideum*. Grâce à une méthode de micro-pochoirs, ils ont créé des micro-colonies de cellules à différentes densités (de 30 à 300 cellules). Puis, en suivant les trajectoires individuelles de cellules, ils ont quantifié l'évolution de la migration au cours de l'étalement des colonies. En isolant, à partir de l'ensemble des trajectoires obtenues, les événements de contacts, ils ont pu mettre en évidence une augmentation transitoire de la vitesse et de la persistance du mouvement après chaque collision cellulaire.

Pour décrire ce phénomène, les cellules sont modélisées par des marcheurs aléatoires bimodaux : d'un état de base à faible persistance, les particules passent temporairement dans un état à persistance élevée après une collision. Lorsque la densité est plus élevée, la fréquence des contacts augmente, et avec elle la proportion de particules très persistantes, accélérant ainsi l'étalement de la colonie. Malgré sa simplicité, ce modèle est en très bon accord avec les données expérimentales et démontre le rôle clef de cet effet de collision, dont la particularité est de perdurer même après la fin du contact dont il découle.



a) Illustration du principe de micro-pochoirs (diamètre 320  $\mu\text{m}$ ) pour confiner initialement les cellules dans des micro-colonies. b) étalement de la colonie après 150 min pour un nombre initiale de cellules de 35 (bleu, à gauche) ou 246 (rouge, à droite).

### En savoir plus

#### Contact enhancement of locomotion in spreading cell colonies

J. d'Alessandro, A. P. Solon, Y. Hayakawa, C. Anjard, F. Detcheverry, J.-P. Rieu et C. Rivière

*Nature Physics* (2017), doi:10.1038/nphys4180

Lire l'article sur la base d'archives ouvertes arXiv

### Contact chercheur

Charlotte Rivière, maître de conférences à l'Université Lyon 1 et chercheur à l'ILM

### Informations complémentaires

Institut Lumière Matière (ILM, CNRS/Univ. Lyon 1)



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Des polymères à la queue-leu-leu pour former des gels injectables

Mai 2017

Biocompatibles, les hydrogels polymériques présentent un grand intérêt dans le domaine biomédical, où ils sont de plus en plus utilisés pour la délivrance contrôlée de substances actives. L'injection est la technique d'implantation la moins invasive, mais requiert des gels capables de passer de l'état solide à liquide en fonction des paramètres appliqués. Une collaboration lyonnaise entre des chimistes et des physiciens a développé et étudié de tels gels formés à base de courtes chaînes de polymère, capables de répondre à ces enjeux.

Du fait de leur forte ressemblance avec les tissus vivants, les hydrogels présentent un grand intérêt pour le domaine médical. Ils sont notamment utilisés pour la délivrance contrôlée de substances actives ou comme matrices résorbables pour la croissance cellulaire et la régénérescence tissulaire. S'ils sont majoritairement constitués d'eau, ils se présentent généralement à l'état solide (pansement, lentilles de contact...). Pour être utilisés pour régénérer des tissus internes, il est nécessaire de les implanter lors d'une intervention chirurgicale, ce qui complique leur utilisation. Idéalement, on souhaiterait pouvoir disposer d'un gel pouvant être tantôt sous forme solide et tantôt sous forme fluide selon les contraintes qu'on lui impose. Ainsi, dans le cadre de l'injection, le gel serait solide dans la seringue, puis fluide au moment du passage dans l'aiguille puis redeviendrait solide dans le corps. Ce comportement de fluide à seuil offre une opportunité d'applications très importante. Dans ce cadre, le contrôle des propriétés du gel, en particulier la maîtrise de son seuil d'écoulement, est un paramètre d'une importance considérable. C'est ce qu'a réalisé une collaboration lyonnaise entre des chimistes du Laboratoire de chimie de l'ENS Lyon (CNRS/ENS Lyon/Univ. Lyon 1) et des physiciens du Laboratoire

de physique de l'ENS Lyon (CNRS/ENS Lyon/Univ. Lyon 1) et de l'Institut Lumière Matière (ILM, CNRS/Univ. Lyon 1) en développant et modélisant de tels gels polymériques. Ils ont synthétisé de courts polymères constitués de charges positives tout au long de la chaîne se terminant à une extrémité par une tête négative. Ils ont montré que ces chaînes s'auto-assemblent à la queue-leu-leu, à la manière des chenilles processionnaires, pour former un fluide à seuil facilement injectable. Enfin, ils ont réalisé un modèle théorique montrant que les propriétés mécaniques de l'hydrogel peuvent varier d'un facteur 1000 suivant la nature de l'ion de la chaîne et de celui de la tête ; ils ont ainsi pu prédire le comportement d'un tel gel *in vivo*. Ces travaux sont publiés dans *Soft Matter*.

En solution aqueuse, chaque chaîne est formée d'une répétition d'unités cationiques, et d'une extrémité anionique, un peu comme une chenille dont les segments sont tous identiques à l'exception de la tête. En partant d'une structure de polymère unique dont ils ont systématiquement fait varier la nature de la paire d'ions/contre-ion répétée le long du corps, les chimistes sont parvenus à moduler les propriétés rhéologiques du gel résultant sur plus de trois ordres de grandeur. Pour comprendre ces variations conséquentes, les physiciens ont dû modéliser l'auto-organisation des polymères dans l'eau. Les têtes chargées négativement s'associent aux corps chargés positivement, formant ainsi ces files processionnaires, dont les variations de longueur, de 1 à 800 chaînes, expliquent les variations de propriétés du matériau. Un modèle basé sur la théorie des polyélectrolytes permet d'extraire de procédures standards de rhéologie les paramètres microscopiques clés du système, comme le degré de condensation des contre ions, l'énergie d'interaction électrostatique inter-chaînes. Ce modèle permet également d'anticiper les propriétés mécaniques des gels en conditions physiologiques, et apporte ainsi une aide précieuse dans la conception de futurs matériaux à propriétés optimisées pour ces applications.

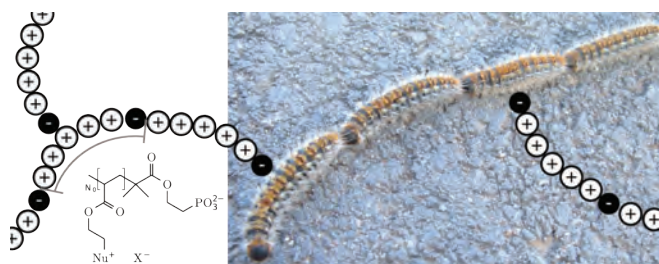


Schéma de l'auto-organisation en processions réticulées, par analogie avec les chenilles processionnaires du pin. Dérivé d'une image d'Arturo Reina, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=282898>.

### En savoir plus

Ion pairing controls rheological properties of "processionary" polyelectrolyte hydrogels

H. Srour, M. Duvall Ayagou, T. Thanh-Tam Nguyen, N. Taberlet, S. Manneville, C. Andraud, C. Monneré et M. Leocmach

*Soft Matter* (2016), doi:10.1039/C6SM02022D

### Contact chercheur

Mathieu Leocmach, chargé de recherche CNRS

### Informations complémentaires

Laboratoire de physique de l'ENS Lyon (CNRS/ENS Lyon/Univ. Lyon 1)

Laboratoire de chimie de l'ENS Lyon (LCH, CNRS/ENS Lyon/Univ. Lyon 1)

Institut Lumière Matière (ILM, CNRS/Univ. Lyon 1)

cnrs

www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie

3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16

T 01 44 96 42 53

inp.com@cnrs.fr

www.cnrs.fr/inp



# Institut de physique

Actualités scientifiques

## Agrégation de protéines : un problème de frustration ?

Octobre 2017

Des physiciens du CNRS et de l'Université de Chicago proposent un nouveau point de vue sur les fibres protéiques associées à la maladie d'Alzheimer : interpréter leur formation comme l'assemblage d'un puzzle aux pièces mal ajustées. Cette étude est publiée dans la revue *Nature Physics*.

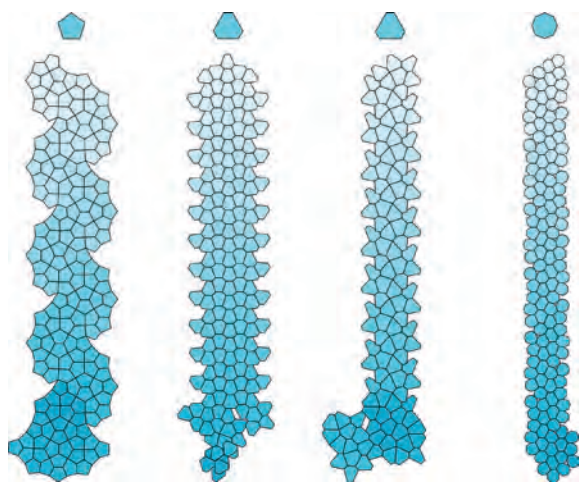
Les cellules de notre corps contiennent de nombreuses machines biochimiques aux rôles variés, les protéines. À l'instar d'autres machines, celles-ci peuvent malheureusement s'enrayer et causer des dégâts dans leur entourage. C'est ce qui arrive au cours de nombreuses maladies neurodégénératives comme la maladie d'Alzheimer, mais aussi de certaines formes de diabète ou d'anémie, où des protéines flottant librement au sein de la cellule commencent à s'agréger les unes aux autres sous formes de longues aiguilles qui entravent alors d'autres processus vitaux.

C'est à cette tendance à former des fibres que se sont intéressés deux physiciens théoriciens du Laboratoire de physique théorique et modèles statistiques (LPTMS, CNRS/Univ. Paris-Sud/Univ. Paris Saclay) et du James Franck Institute (Univ. Chicago). En marge de l'approche traditionnelle consistant à observer l'agrégation d'un type de protéine spécifique au moyen de techniques expérimentales perfectionnées, les chercheurs se sont demandés si l'omniprésence de fibres lors de l'agrégation de

protéines de formes pourtant très différentes pourrait être la manifestation d'un principe physique général et encore inconnu. En réfléchissant aux différences entre une protéine et les objets relativement symétriques auxquels s'intéressent habituellement les physiciens, ils ont ainsi supposé que la surface très irrégulière des protéines les empêche justement de s'emboîter proprement pour former un agrégat tridimensionnel régulier, similaire aux cristaux qui apparaissent lorsque s'empilent des atomes.

Afin de démontrer que la seule présence d'irrégularités peut induire une morphologie fibreuse, les physiciens ont étudié des objets aussi simples que possible, mais néanmoins incapables de s'emboîter proprement pour former un cristal. Au contraire d'une collection de cubes ou des pièces d'un puzzle, de telles particules forment des agrégats dits « frustrés ». Au moyen de calculs mathématiques et par ordinateur, les chercheurs ont ainsi simulé la formation d'agrégats de polygones flexibles tels que des pentagones, des hexagones irréguliers ou des octogones.

Les résultats sont frappants : quelque soit la particule utilisée, des fibres se forment toujours dans le régime de paramètre attendu, suggérant donc que moyennant une complexité de forme suffisante, des particules identiques auront toujours une tendance à s'assembler sous forme de fibres. « Notre espoir est de permettre aux spécialistes de l'agrégation de protéines de discerner une forme de simplicité dans ces systèmes par ailleurs extrêmement complexes, et de les guider vers une meilleure compréhension de certaines maladies », affirme ainsi Martin Lenz. Ce nouveau principe pourrait par ailleurs inspirer des méthodes pour la fabrications de nouveaux matériaux à partir de nano objets irréguliers – démontrant ainsi que des idées de physique fondamentale peuvent nourrir des domaines d'application fort variés !



Exemples de particules frustrées et des fibres qu'elles forment lorsque leur agrégation est simulée par un ordinateur. Les particules au sein des fibres sont déformées, et chaque nouvelle particule s'ajoute préférentiellement au sommet de l'agrégat pour éviter de déformer encore plus les particules déjà présentes.

### En savoir plus

[Geometrical frustration yields fiber formation in self-assembly](#)

Martin Lenz et Thomas A. Witten

*Nature Physics* (2017), doi:10.1038/nphys4184

Lire l'article sur la base d'archives ouvertes ArXiv

### Contact chercheur

Martin Lenz, chercheur CNRS

### Informations complémentaires

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



www.cnrs.fr

Institut de Physique

CNRS - Campus Gérard Mégie  
3 rue Michel-Ange, 75794 Paris Cedex 16  
T 01 44 96 42 53  
inp.com@cnrs.fr  
www.cnrs.fr/inp



# Institut de physique

Communiqué de presse

## Une nouvelle compréhension des échanges gazeux pulmonaires

mars 2016

Comment se déroulent les échanges gazeux dans les poumons ? Les recherches menées par Bernard Sapoval, directeur de recherche émérite du CNRS, et Min-Yeong Kang, post-doctorant, au Laboratoire de physique de la matière condensée (LPMC, Ecole Polytechnique/CNRS) démontrent que l'interprétation traditionnelle de la quantification des échanges dans le poumon humain est erronée. Ces travaux ont déjà fait l'objet de deux publications scientifiques.

La compréhension du transport et de la capture de molécules gazeuses par le sang est d'une importance capitale. Une des difficultés majeures de la pneumologie actuelle réside dans la limitation des moyens d'exploration fonctionnelle due notamment à la complexité du poumon. Imaginée il y a un siècle, la capacité de transfert du monoxyde de carbone (TLCO) est devenue un examen de routine en exploration fonctionnelle respiratoire, plus particulièrement depuis qu'une interprétation « plausible » a été proposée par F.J. Roughton et R.E. Forster en 1957. Depuis, cette interprétation sert de référence. Utilisée dans tous les services de pneumologie dans le monde, ce modèle est enseigné aux futurs médecins. Il est également présenté dans les livres de médecine. Or l'équipe de Bernard Sapoval vient de mettre à mal cette interprétation car elle est basée sur une conjecture mathématique inexacte.

Cette conjecture consistait à considérer que le processus de capture de gaz peut être scindé en deux phases indépendantes : transport vers les globules rouges et capture dans ces  $2/2$  globules. Les calculs complets du processus démontrent au contraire l'interdépendance de ces deux phases. La même équipe a proposé un nouveau modèle d'interprétation plus fiable. Ces résultats remettent en cause un nombre considérable de publications sur le sujet ainsi que les techniques de mesure. L'enjeu est important, tant du point de vue du diagnostic médical qu'industriel. Une collaboration entre l'Université de Bordeaux (Pr H.-J. Guénard) ; le service des Explorations fonctionnelles de l'hôpital Cochin (Pr A.T. Dinh-Xuan) ; le CHU UCL Namur (Dr J.-B. Martinot, Respisom (Centre de Recherches Médicales sur la Respiration, Erpent, Namur)) et l'équipe de Bernard Sapoval est en cours.

Laboratoire de physique de la matière condensée. Contact chercheur :  
Bernard Sapoval, [bernard.sapoval@polytechnique.edu](mailto:bernard.sapoval@polytechnique.edu)

THÉMATIQUES



5

SPATIAL - ASTRONOMIE



11

SONDER LA MATIÈRE



25

ÉCHELLE NANO &  
PARTICULES UNIQUES



37

TRANSITIONS DE PHASE  
& ORDRE ET DÉSORDRE



51

GRAINS, FLUIDES  
ET SOLIDES



61

PHYSIQUE ET VIVANT



69

INNOVATION



73

INTERFACE



# Institut de physique

Articles parus dans la lettre innovation du CNRS

## Les ondes térahertz dans la ligne de mire du CNRS

avril 2017

Sources, détecteurs, systèmes, composants, le CNRS s'intéresse à toute la chaîne de fabrication et de mise en œuvre des ondes térahertz (THz). Ces technologies figurent parmi les vingt focus transfert, des domaines de recherche d'intérêt national et international à haut potentiel d'innovation, sur lesquels se positionne le CNRS.

Dévoiler des armes cachées et invisibles aux rayons X, caractériser finement et sans contact les composants d'une substance solide, liquide ou même gazeuse : les ondes électromagnétiques térahertz (THz) repoussent les frontières de la détection et instaurent un rapport nouveau à la matière.

Historiquement connues sous la terminologie d'infrarouge lointain, ces ondes s'étendent sur une bande de fréquence entre 0,1 et 30 THz. Intermédiaires entre les fréquences radioélectriques des micro-ondes et les fréquences optiques de l'infrarouge, elles concentrent l'attention des chercheurs depuis une trentaine d'années.

Et pour cause, leurs propriétés sont nombreuses : leur fort pouvoir pénétrant offre notamment la possibilité de voir à travers de nombreux matériaux non conducteurs, tels que le béton, les vêtements, le papier, le carton, les plastiques... Totalement absorbés par les matériaux à molécules polaires, l'eau en particulier, et par les bons conducteurs électriques, tels que les métaux, les ondes THz présentent également l'avantage de maintenir la matière et les organismes intacts. Mais surtout, par opposition aux rayons X, elles sont peu énergétiques et non-ionisantes, ce qui les rend possiblement peu nocives.

Les applications développées couvrent aujourd'hui de multiples champs d'activités. Elles concernent notamment la défense et la sécurité, dont la détection d'armes, de drogues ou d'explosifs ; le biomédical, avec l'étude de l'hydratation et de la conformation des protéines et de l'ADN, et la détection de certaines cellules cancéreuses riches en eau ; les télécommunications, avec la transmission haut débit ; ou l'industrie, et le contrôle non destructif de pièces et la maintenance préventive. En 2015, ce dernier secteur représentait 46 % du marché des systèmes THz et son taux de croissance annuel moyen est estimé à 40 % jusqu'en 2022.

Pour atteindre et générer des ondes THz, plusieurs dispositifs ont été mis au point. On compte les lasers à cascade quantique, les corps noirs, les diodes électroniques, les carcinotrons, les lasers à électrons libres, les lasers moléculaires et les sources à semi-conducteurs.

Aujourd'hui, le marché mondial des technologies THz comprend quatre secteurs d'activité majoritaires : celui des sources d'ondes THz, des détecteurs, des systèmes et celui des composants. Au moins 63 entreprises actives ont été identifiées. Ce marché, qui d'ici 2020 devrait atteindre 98 millions de dollars US, est dominé par quatre entreprises, dont deux européennes - Menlo Systems, spin-off de l'Institut Max Planck, et TeraView, issue du laboratoire Cavendish de l'université de Cambridge - une américaine - Microtech Instruments Inc - et une japonaise - Advantest. Alors que les grandes entreprises (36 % du marché mondial) développent toute la chaîne de valeurs, les entreprises intermédiaires (37 %) et les PME (27 %) focalisent leur R&D sur les sources et les détecteurs d'ondes THz.

En Europe, le marché s'oriente principalement vers le secteur des systèmes THz et cherche à répondre à trois besoins : détecter des objets et des défauts sur de grandes surfaces, mesurer une épaisseur, et caractériser chimiquement et structuralement de petits objets et défauts sur de petites surfaces ou volumes.

### Le CNRS dans le THz en Europe

Le domaine des ondes THz comptabilise, à l'échelle européenne, 1 336 familles de brevets déposés depuis 2000, dont 38 impliquent le CNRS (27 unités). L'organisme est ainsi le deuxième déposant de brevets, les instituts Fraunhofer étant les premiers et le CEA troisième. Le portefeuille CNRS s'étend sur toute la chaîne de valeurs des ondes THz et se compose majoritairement de brevets amont (sources, détecteurs). Peu de ces brevets ont été co-déposés avec des industriels. 81 % des dépôts sont postérieurs à 2009 et 76 % du portefeuille CNRS est encore actif aujourd'hui. Positionné sur des marchés importants à moyen et long terme, le CNRS revendique des champs applicatifs précis : 53 % des familles de brevets déposés concernent les télécommunications, le contrôle non destructif et le biomédical. 13 % du portefeuille a été transféré vers l'industrie à ce jour.

Le domaine a également donné lieu à 14 954 publications par des acteurs européens (Russie incluse), dont 1 888 émanent du CNRS, avec un rythme de publication d'environ 200 publications par an ces trois dernières années. Le CNRS est ainsi le premier publiant européen et est impliqué dans 86 % des publications françaises. Une vingtaine de laboratoires CNRS, répartis sur l'ensemble du territoire, concentrent 88 % des publications, et huit d'entre eux regroupent 66 % des dépôts de brevets.

La voie de valorisation la plus fréquente pour le CNRS reste celle de la signature de licences d'exploitation sur ses brevets. Par ailleurs, cinq start-up, issues de laboratoires CNRS, ont été créées dans le domaine : Lytid, issue du [Laboratoire matériaux et phénomènes quantiques](#), se positionne sur le marché des sources, NeTHIS, liée à l'Institut de mécanique et d'ingénierie de Bordeaux, se concentre sur celui des détecteurs, Teratronics, issue du Laboratoire de chimie physique, sur celui des détecteurs et des systèmes Selenoptics, issue de l'Institut de sciences chimiques de Rennes, se positionne sur le marché des composants comme les fibres optiques, et T-Waves, spin-off du [Laboratoire Charles Coulomb](#), se concentre sur celui des détecteurs et des systèmes. Plusieurs autres start-up sont actuellement en cours de création.

Le marché des ondes THz arrivant aujourd'hui à maturité, le CNRS affirmera d'ici 2022 son positionnement et intensifiera ses liens avec les industriels. Pour cela, il s'appuiera sur un réseau de recherche déjà bien structuré comprenant notamment le groupement de recherche NanoTeraMir. L'objectif de ce dernier est de favoriser les liens et les échanges entre les différents acteurs français de la recherche dans les domaines des fréquences THz et infrarouges moyen, en nanosciences et nanotechnologies.

Laboratoire Charles Coulomb  
& laboratoire Matériaux et phénomènes quantiques

Contact chercheur : Frédéric Teppe, [frederic.teppe@umontpellier.fr](mailto:frederic.teppe@umontpellier.fr)





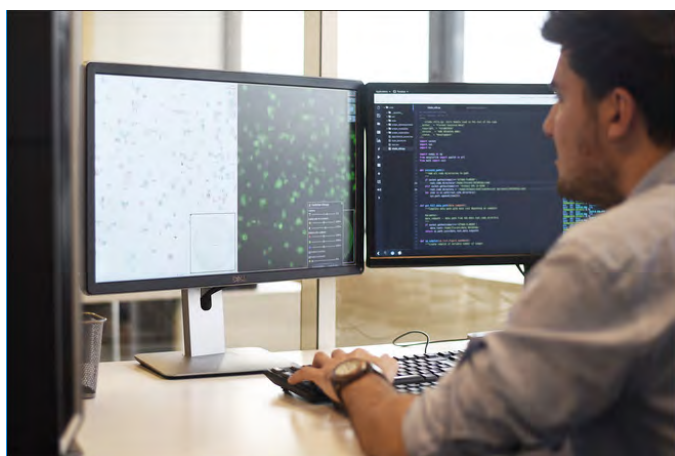
# Institut de physique

Articles parus dans la lettre innovation du CNRS

## VitaDX : l'intelligence artificielle au service de la détection précoce de cancers

juin 2017

Grâce à des algorithmes d'analyse d'images et d'apprentissage statistique, la start-up VitaDX, née des travaux en imagerie de fluorescence de l'institut des sciences moléculaires d'Orsay, va automatiser la détection précoce du cancer de la vessie.



Des algorithmes développés en collaboration avec l'ONERA permettent d'automatiser la détection de cellules tumorales dans des échantillons d'urine. Crédits : VitaDX

Le cancer de la vessie est le cinquième cancer le plus fréquent en France, mais les méthodes utilisées pour sa détection précoce demeurent peu efficaces. VitaDX veut répondre à cet enjeu de santé publique en faisant entrer l'analyse cytologique – l'observation des cellules présentes dans l'urine afin de détecter les cellules tumorales – dans l'ère du numérique et de l'intelligence artificielle. La start-up, créée en 2015 à partir de travaux sur l'imagerie de fluorescence menés à l'Institut des sciences moléculaires

d'Orsay, va automatiser le diagnostic précoce du cancer de la vessie grâce à des algorithmes d'analyse d'images et d'apprentissage statistique. Elle valorise ainsi la nouvelle méthode d'imagerie biologique mise au point au laboratoire, qui détecte de manière plus efficace les cellules tumorales. Un brevet a été déposé en 2009 et VitaDX en détient une licence d'exploitation exclusive.

VitaDX, l'Onera et la SATT Paris-Saclay ont signé en avril 2017 un contrat de transfert pour mettre au point une version commercialisable du nouvel instrument. L'Onera développe une suite d'algorithmes d'interprétation d'images fondés sur l'apprentissage statistique : l'ordinateur apprend à réaliser des diagnostics en accumulant des images d'échantillons d'urine sur lesquels un diagnostic a préalablement été effectué par un médecin. A la fin de cet apprentissage, les performances de l'instrument seront testées sur des séries d'échantillons.

Début juin 2017, VitaDX a levé 1,6 million d'euros auprès des fonds d'investissement GO CAPITAL Amorçage II et AURIGA IV Bioseeds et de deux investisseurs privés. Le but est de poursuivre le développement du logiciel de traitement d'image VisioCyt®. Une première version commerciale est annoncée pour le début de 2020. Elle sera proposée à des grands laboratoires d'analyses médicales. L'entreprise, qui compte aujourd'hui 14 personnes, commence aussi à prospecter en Europe, en s'appuyant sur les laboratoires déjà implantés internationalement et en élargissant ses contacts. Elle envisage par ailleurs d'autres applications potentielles, pour la détection de cancers du poumon, de l'estomac ou de la thyroïde.

Institut des sciences moléculaires d'Orsay

Contact chercheur : Marie-Pierre Fontaine-Aupart, [marie-pierre.fontaine-aupart@u-psud.fr](mailto:marie-pierre.fontaine-aupart@u-psud.fr)

Retrouvez toutes les actualités de la lettre innovation du CNRS sur [www.cnrs.fr/cnrsinnovation-lalettre](http://www.cnrs.fr/cnrsinnovation-lalettre)



THÉMATIQUES



SPATIAL - ASTRONOMIE



SONDER LA MATIÈRE



ÉCHELLE NANO & PARTICULES UNIQUES



TRANSITIONS DE PHASE & ORDRE ET DÉSORDRE



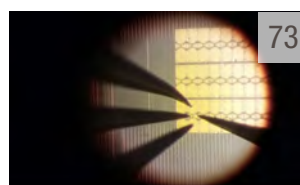
GRAINS, FLUIDES ET SOLIDES



PHYSIQUE ET VIVANT



INNOVATION



INTERFACE



# Institut de physique

Actualités interfaces

## Physique-Chimie : Des hydrogels photo-commutables pour des applications biomédicales - janvier 2017

Inspirés par les hydrogels naturels, les chimistes développent des matériaux de synthèse aux propriétés uniques : forte teneur en eau, douceur, flexibilité ou biocompatibilité. Leur ressemblance avec les tissus vivants présente un grand intérêt pour le domaine biomédical. En quête de leur optimisation, des chercheurs de l'Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg (CNRS/Université de Strasbourg) et de l'Institut de sciences et d'ingénierie supramoléculaires (CNRS/Université de Strasbourg) les ont dotés de pouvoirs d'auto-réparation mais aussi de transformation sous stimuli lumineux. Des résultats parus dans la revue *Chem.Eur.J.* [...]

Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg

## Physique-Chimie : Molécules magnétiques déposées sur surface : du nouveau en spintronique - février 2017

Miniaturiser les supports des dispositifs de stockage d'information binaire est aujourd'hui un enjeu fort en spintronique. Des molécules magnétiques susceptibles de remplir cette mission sont déjà connues. Mais pour les insérer dans nos appareils numériques, encore faut-il les déposer sur une surface pour les séparer les unes des autres et les manipuler sans qu'elles perdent leur propriété de bistabilité (état 0 ou 1). Un véritable challenge que les chercheurs de l'Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay (CNRS/Université Paris-Sud) ont relevé. Ces travaux sont parus dans la revue *Nature Comm.* [...]

Service de physique de l'état condensé, Unité mixte de physique CNRS/Thales, Synchrotron SOLEIL, Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie

## Physique-Ingénierie : Quand la lumière s'auto-organise dans les fibres optiques - mars 2017

Si les fibres optiques multimodes permettent de transporter une grande quantité d'énergie, elles sont sujettes à des interférences qui nuisent à la qualité de la transmission d'informations. Des chercheurs du laboratoire XLIM, de l'ICB et de l'université de Brescia (Italie) ont démontré qu'augmenter la puissance de la lumière injectée entraîne son auto-organisation et réduit ces interférences. Ces travaux ont été publiés dans la revue *Nature Photonics.* [...]

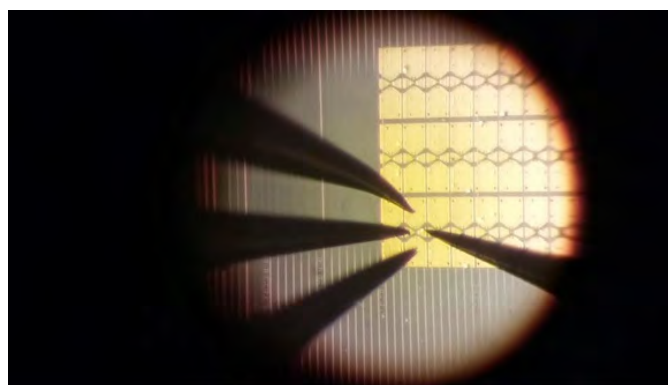
Laboratoire interdisciplinaire Carnot de Bourgogne

## Physique-Ingénierie : Naissance des nanodiodes électro-optiques - avril 2017

Une cartographie de l'état de dégradation de parchemins historiques vient d'être réalisée pour la première fois grâce à une technique de microscopie optique, précédemment optimisée pour l'imagerie du collagène dans les tissus biologiques. Ce travail a été effectué par des physiciens et chimistes de l'Université Paris-Sud, du CNRS, du Ministère de la culture et de la communication, de l'École polytechnique et de l'Université Pierre et Marie Curie. L'invasivité minimale et la rapidité de cette méthode permettent d'envisager le diagnostic sans contact ni prélèvement de

grandes collections ainsi que le suivi régulier d'œuvres fragiles. Ces résultats obtenus sur des parchemins historiques dans le cadre d'une collaboration pluridisciplinaire sont publiés dans la revue *Scientific Reports* du 19 mai 2016. [...]

Centre de nanosciences et de nanotechnologies

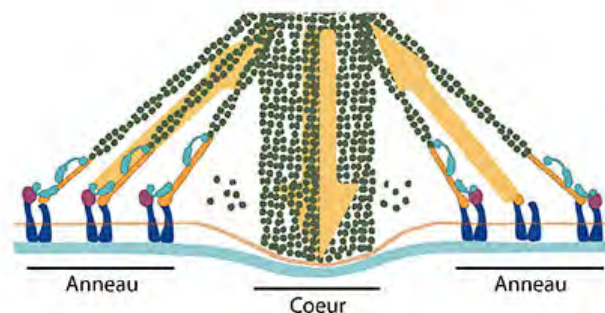


© CNRS/Univ. Paris-Sud/Univ. Paris-Saclay

## Physique-Biologie : Que la force soit avec le podosome - avril 2017

Les macrophages, cellules clés de notre système immunitaire, sondent leur environnement grâce à des structures d'adhérence appelées podosomes. L'équipe d'Isabelle Maridonneau-Parini à l'Institut de pharmacologie et de biologie structurale, précise l'architecture nanométrique et le fonctionnement mécanique de ces structures. En couplant microscopie 3D à l'échelle nanoscopique et mesures de forces de protrusion, il a été possible de démontrer que le podosome est un générateur autonome de force où sont couplées une force de protrusion et une force de traction. Ce travail a été publié le 29 mars 2017 dans la revue *ACS Nano.* [...]

Institut des sciences moléculaires d'Orsay



© Renaud Poindeux & Aravis Bouissou

## Physique-Chimie : Mouvement brownien : l'exception qui confirme la règle - mai 2017

Conséquence de l'agitation thermique des molécules d'un fluide, le mouvement brownien se traduit par un déplacement d'autant plus rapide que les particules en présence sont petites. En reproduisant un fluide complexe structurellement comparable aux membranes biologiques, des



# Institut de physique

## Actualités interfaces

chercheurs du Centre de recherche Paul Pascal (CNRS/Université de Bordeaux) et de l'université de Louvain en Belgique obtiennent un résultat contre-intuitif : les particules plus grosses se déplacent plus vite. Très fondamental mais potentiellement précurseur de nouvelles stratégies pour délivrer les médicaments, ce résultat est publié dans la revue *Physical Review Letters*. [...]

[Centre de recherche Paul-Pascal](#)

### Physique-Ingénierie : Pourquoi les pelotes de mer ne se dévident pas - mai 2017

Si elles intriguent les promeneurs du bord de mer, les œgagropiles suscitent aussi des interrogations chez les scientifiques. Des chercheurs de l'IRPHE, du LPS et du Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon se sont penchés sur la formation de ces pelotes de fibres végétales, un processus qui façonne des matériaux plus résistants qu'il n'y paraît. Ces travaux sont publiés dans la revue *PNAS*. [...]

[Laboratoire de physique statistique, Laboratoire de physique de l'ENS de Lyon](#)



© Sébastien Moulinet

### Physique-Chimie : Comment un matériau poreux peut-il trier les gaz ? - mai 2017

Des chercheurs de l'Institut de physique de Rennes (CNRS/Université de Rennes 1) ont utilisé une méthode combinant simulations de type dynamique moléculaire et Monte Carlo pour démontrer que le processus de respiration dans la MIL-53(Cr) pouvait être induit par un champ électrique. Par ailleurs, en présence de  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ , ces chercheurs ont montré que le MIL-53(Cr), en présence de ce champ électrique, pouvait maintenir sa forme fermée durant l'adsorption de ces gaz, entraînant une séparation complète de  $\text{CO}_2$  par exclusion du  $\text{CH}_4$ , trop volumineux pour rester dans les pores. Cette respiration électriquement stimulable fournit ainsi les bases de nouvelles applications dans les technologies de séparation et d'adsorption de gaz à l'aide de ces matériaux poreux. Ces travaux sont publiés dans la revue *ACS Central Science*. [...]

[Institut de physique de Rennes](#)

### Physique-Chimie : Comment une surface peut guider l'auto-assemblage moléculaire ? - mai 2017

Des équipes marseillaises ont étudié une réaction de polymérisation de nano-rubans organiques, indispensables à l'électronique moléculaire, directement sur une surface d'argent, en combinant pour la première fois microscopie à effet tunnel et spectroscopie vibrationnelle. Ce travail publié dans *Nature Communications* montre que c'est la structure atomique de la surface qui guide la réaction chimique d'auto-assemblage. [...]

[Institut matériaux micro-électronique nanosciences de Provence](#)

### Physique-Terre Solide : Troisième détection d'ondes gravitationnelles : la confirmation de l'existence d'une nouvelle population de trous noirs - juin 2017

Pour les collaborations scientifiques LIGO et Virgo, l'aventure continue avec l'annonce d'une troisième détection d'ondes gravitationnelles. L'événement a été enregistré au cours de la campagne actuelle de prise de données des deux détecteurs LIGO qui a démarré le 30 novembre dernier et se poursuivra pendant l'été. Comme pour les deux premiers événements fin 2015, les signaux enregistrés ont été générés lorsque deux trous noirs ont fusionné en un plus gros. Le nouveau trou noir, situé à près de 3 milliards d'années-lumière de la Terre (soit deux fois plus loin que pour les deux systèmes déjà découverts) est environ 49 fois plus lourd que le Soleil, une masse intermédiaire par rapport aux résultats des deux fusions observées en 2015 (21 et 62 masses solaires). Cette découverte est décrite dans un nouvel article publié le 1<sup>er</sup> juin 2017 par la revue scientifique *Physical Review Letters*. [...]

[Laboratoire Kastler Brossel](#)

### Physique-Terre Solide : De l'histoire de la Terre à la mécanique quantique - juin 2017

La plupart des processus géologiques modelant la Terre entraînent des enrichissements isotopiques qui leur sont particuliers, et qui constituent en quelque sorte leur signature. Lorsque ces mécanismes d'enrichissement sont bien compris, la mesure des compositions isotopiques des roches peut alors servir à reconstruire les climats passés, à comprendre la dynamique interne de la Terre ou la formation du Système solaire. La prédiction théorique de ces processus d'enrichissement est indispensable à leur compréhension, mais se heurte à leur nature à la fois quantique et dynamique. Pour les solides et les gaz, une approche simplifiée est suffisante, mais le cas des liquides reste problématique. Pour la première fois, une étude théorique montre que pour comprendre et prédire le comportement d'isotopes dans des systèmes complexes contenant une phase liquide, une approche plus précise est nécessaire et possible. Ce résultat, obtenu par des chercheurs du GET et du CEMES, a des implications majeures pour la compréhension de l'évolution de notre planète, car les processus isotopiques sont des marqueurs quantitatifs d'un grand nombre de processus (érosion, altération, interactions géosphère-biosphère). Ces travaux ont été publiés dans la revue *Accounts of Chemical Research*, le 23 juin 2017.

[Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales](#)

### Physique-Univers : Corrélation entre structures et propriétés électroniques dans les agrégats de PAH - juillet 2017

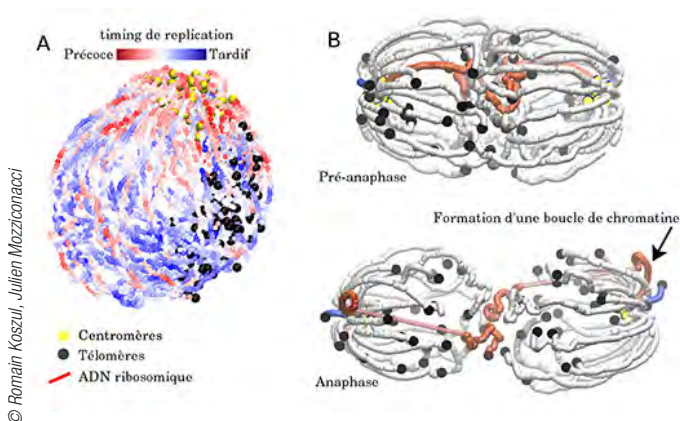
Une équipe interdisciplinaire française impliquant des laboratoires toulousains et de la région parisienne ont combiné la mesure de spectres de photo-ionisation au synchrotron SOLEIL avec des simulations moléculaires et ont pu établir la corrélation entre structures et propriétés électroniques (ionisation) d'agrégats de molécules polycycliques aromatiques hydrogénées (PAH) en phase gazeuse. La connaissance de ces structures va permettre de mieux caractériser les propriétés de ces agrégats en particulier leur spectroscopie et leur stabilité afin d'avancer dans notre compréhension du rôle de ces systèmes dans la chimie des régions de formation d'étoiles ainsi que dans les flammes. [...]

Synchrotron SOLEIL, Institut des sciences moléculaires d'Orsay

### Physique-Biologie : Orchestration de la dynamique tridimensionnelle des chromosomes lors du cycle cellulaire - août 2017

A chaque division cellulaire, le patrimoine génétique contenu dans les chromosomes doit être dupliqué et ségrégué dans les cellules filles. Ces processus sont accompagnés de modifications structurales, régulées par des protéines conservées chez la plupart des organismes vivants. Des chercheurs de l'équipe Régulation spatiale des génomes à l'Institut Pasteur et du laboratoire de Physique théorique de la matière condensée à l'UPMC, ont suivi les transitions structurales des 16 chromosomes du génome de levure au cours du cycle cellulaire en étudiant leur organisation tridimensionnelle dans des populations synchronisées et/ou mutantes. Cette étude révèle en outre un possible nouveau mécanisme facilitant la ségrégation des chromosomes.

Laboratoire de physique théorique de la matière condensée



### Physique-Chimie : Nanoparticule de platine et molécule fonctionnalisée : un couplage bénéfique pour la nanoélectronique verres en fusion - septembre 2017

Des chercheurs du Laboratoire de physique et chimie des nano-objets (CNRS/INSA/Université de Toulouse), du Laboratoire de chimie de coordination (CNRS) et du Centre inter-universitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux (CNRS/INSA/Université de Toulouse) ont réalisé de nouveaux auto-assemblages de nanoparticules de platine ultra-petites,

en les liant par des molécules fonctionnalisées. Ils ont montré que les propriétés électroniques de ces assemblages pouvaient être contrôlées par de légères modifications de leurs constituants. Ils ont également observé que c'est plus particulièrement la nature des molécules qui permet de contrôler la charge des nanoparticules, c'est-à-dire leur propriété électronique. [...]

Laboratoire de physique et chimie des nano-objets

### Physique-Biologie : Tumeur du cerveau : la piste prometteuse des magnétosomes - octobre 2017

Le glioblastome est le cancer du cerveau le plus fréquent chez l'adulte. Malgré des avancées thérapeutiques significatives réalisées ces dernières années, le glioblastome demeure un cancer particulièrement résistant aux traitements conventionnels. Une nouvelle approche thérapeutique, fondée sur l'hyperthermie magnétique pour provoquer la destruction des cellules tumorales par un chauffage localisé de nanoparticules, a été développée sous la direction d'Edouard Alphandéry de l'Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie, au sein de la start-up Nanobactérie et en collaboration avec des équipes des hôpitaux universitaires de la Pitié-Salpêtrière et de Bicêtre. [...]

Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie

### Physique-Biologie : Comment les poissons interagissent et coordonnent leurs déplacements dans un banc - novembre 2017

Les mécanismes qui gouvernent les déplacements collectifs de bancs de poissons, de nuées d'oiseaux ou de troupes de mammifères restent encore mystérieux. Comment les individus interagissent-ils au sein de ces groupes pour coordonner leurs mouvements et quels types d'informations utilisent-ils pour cela ? Des chercheurs du Centre de recherches sur la cognition animale et du Laboratoire de physique théorique, en collaboration avec des équipes du Centre des sciences de la complexité de Bristol, de l'Université de Roehampton à Londres et de l'Université Normale à Pékin, ont étudié comment des poissons s'influencent mutuellement lorsqu'ils effectuent collectivement des changements spontanés de direction. Les résultats montrent que pour coordonner leurs déplacements les poissons interagissent avec un petit nombre de leurs voisins et changent régulièrement les individus sur lesquels ils portent leur attention. [...]

Laboratoire de physique théorique

### Physique-Ingénierie : Des vibrations pour mesurer les microfibrilles optiques - novembre 2017

Les nanotechnologies ont miniaturisé les composants électroniques au point qu'ils nécessitent de nouveaux outils de mesure. Des chercheurs de l'Institut Femto-ST et du laboratoire Charles Fabry ont ainsi réussi à mesurer le diamètre de microfibrilles optiques grâce à des vibrations sonores. Alors qu'elle est bien plus simple à utiliser, cette méthode partage la précision des meilleures techniques disponibles. Ces travaux sont publiés dans la revue *Optica*. [...]

Laboratoire Charles Fabry

Direction de la publication

**Alain Schuhl**

Conception

**Marie Signoret  
Marine Charlet-Lambert  
Jean-Michel Courty**

Adaptation graphique et mise en page

**Marine Charlet-Lambert**

Contact

**[inp.com@cnrs.fr](mailto:inp.com@cnrs.fr)**

Imprimeur

**Bialec**

Mars 2018



**CNRS**

Institut de physique

3, rue Michel-Ange  
75794 Paris Cedex 16

**T 01 44 96 42 53**

**[www.cnrs.fr/inp](http://www.cnrs.fr/inp)**