

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06
01 55 42 84 00

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Sean Bailly

Dossier Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe

Directrice artistique : Céline Lapert

Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion : Laurence Hay et Ophélie Maillet

Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry

et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique : Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

David Aubin, Yves Bertheau, Frédéric Flin, Sophie Gallé-Soas,

Capucine Jahan, François Lè, Frédéric Libersat, Laurent Misery,

Aurélien Perrin, Christophe Pichon, Anthony Sladen,

Daniel Tacquenot

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr - 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(jf.guillotin@pourlascience.fr)

Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne : <http://boutique.pourlascience.fr>

Courriel : pourlascience@abopress.fr

Téléphone : 03 67 07 98 17

Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science,
19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros

France métropolitaine : 59 euros - Europe : 71 euros

Reste du monde : 85,25 euros

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES

Pour la Science,

628 avenue du grain d'or, 41350 Vineuil

pourlasciencevpc@daudin.fr • Tél. : 02 18 54 12 64

DIFFUSION

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tel : 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort :

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief : Mariette DiChristina.

Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak. Editors :

Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth Fletcher,

Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong.

President : Keith McAllister. Executive Vice President : Michael Florek.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public

français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou

les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans

la revue « Scientific American », dans les livres édités par

« Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la

Science S.A.R.L. », 8 rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de tra-

duction, d'adaptation et de représentation

réservés pour tous les pays. La marque et le

nom commercial « Scientific American » sont

la propriété de Scientific American, Inc. Li-

cence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est in-

terdit de reproduire intégralement ou partiellement

la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou

du Centre français de l'exploitation du droit de co-

pie (20 rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).



Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Deux, trois, quatre, cinq...

Depuis le milieu du siècle dernier, le monde des particules subatomiques s'est révélé foisonnant. Aux constituants des atomes – l'électron, le proton et le neutron – se sont ajoutées une ribambelle de particules presque toutes instables, donc éphémères.

Dans ce fatras, le modèle des quarks proposé en 1964 a mis de l'ordre : les hadrons – les membres de la prolifique famille des particules sensibles à l'interaction forte – sont composés soit de trois quarks, à l'instar du proton et du neutron, soit d'un quark et d'un antiquark. Le modèle des quarks s'est même mué en une théorie fondamentale de l'interaction forte, la chromodynamique quantique, qui est aujourd'hui l'un des piliers de la physique des particules.

Les quarks peuvent-ils former plus que des duos ou des trios ? La théorie ne l'interdit pas ; elle le prédit même. Mais ce n'est qu'à partir de 2003, avec l'augmentation de l'énergie des collisions dans les accélérateurs de particules, que de possibles tétraquarks – des systèmes de quatre quarks – ont commencé à poindre dans les détecteurs.

De nouvelles naissances dans la grande famille des hadrons

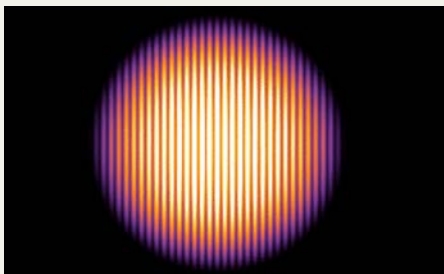
Ces recherches ont atteint une maturité ces dernières années, en particulier grâce à la mise en service du collisionneur LHC, au Cern. Avec des résultats réjouissants : comme le relatent Georg Wolschin et Renaud le Gac (*voir pages 20 à 28*), plusieurs tétraquarks et pentaquarks ont été mis en évidence au LHC depuis 2015.

Ces découvertes ont fait moins de bruit que celle du boson de Higgs, en 2012, mais elles sont presque aussi importantes. Elles ne font pas qu'agrandir le zoo des particules ; elles confirment la théorie de l'interaction forte, où les calculs sont notoirement difficiles, et suggèrent même des pistes pour l'approfondir. La physique des particules est encore pleine d'avenir. ■

3 **Édito**

Actualités

- 6 **Un supersolide créé pour la première fois en laboratoire**



- 7 **Un intestin humain fonctionnel reconstitué**

- 8 **Comment le cannabis perturbe la mémoire**

- 11 **SOLEIL fait la lumière sur la cire perdue**

- 12 **Des noyaux atomiques qui font des bulles**

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

- 14 **Point de vue**
Recherche : la France n'investit plus assez pour garder son rang

Alain Fuchs

- 16 **Cabinet de curiosités sociologiques**
J'en étais sûr !

Gérald Bronner

- 18 **Homo sapiens informaticus**
Les ordinateurs, rois de la mise en abyme

Gilles Dowek



Ce numéro comporte une offre de parrainage *Pour la Science* sur une sélection d'abonnés de France métropolitaine.
En couverture : © Pour la Science

À LA UNE

20 **PHYSIQUE DES PARTICULES** **Des quarks aux pentaquarks**

Georg Wolschin

Constituants fondamentaux de la matière, les quarks s'assemblent en duos ou en trios pour former les protons, les neutrons et d'autres particules instables. Or les collisions à haute énergie du LHC, au Cern, ont récemment produit des assemblages de quatre ou cinq quarks : des particules jusque-là inconnues !

30 **NEUROBIOLOGIE** **Ces démangeaisons qui nous rendent fous**

Stephani Sutherland

Piqûre d'insecte, eczéma, urticaire, allergie... : les démangeaisons associées peuvent nous amener à nous gratter jusqu'au sang. Les mécanismes physiologiques en jeu se dévoilent et révèlent des liens avec ceux de la douleur.

38 **PLANÉTOLOGIE** **Sous l'océan d'Encelade**

Frank Postberg, Gabriel Tobie et Thorsten Dambeck

On en est de plus en plus certain : le fond de l'océan souterrain d'Encelade, lune glacée de Saturne, est criblé de cheminées hydrothermales actives. Ce qui en fait l'un des lieux les plus prometteurs pour rechercher des formes de vie extraterrestre.



48 **ÉTHOLOGIE** **La guêpe émeraude et sa blatte-zombie**

Christie Wilcox

En injectant son venin, une petite et chatoyante guêpe met à sa merci une blatte et fait de celle-ci un repas vivant pour sa progéniture. Un très bel exemple de manipulation neurologique d'une espèce par une autre.



54 **PALÉONTOLOGIE** **Les géants du ciel**

Daniel Ksepka et Michael Habib

Les *Pelagornis* ont survolé les mers pendant plus de cinquante millions d'années. Avec leur envergure de plus de 6 mètres, comment faisaient ces oiseaux pour décoller ?

62 **BIOLOGIE** **Une boussole dans les cellules**

Paul Adler et Jeremy Nathans

Si les cellules s'alignent si bien dans les tissus de l'organisme, c'est grâce à un petit groupe de gènes qui les informent sur l'orientation de leurs voisins.

70 **HISTOIRE DES SCIENCES** **Pourquoi les nazis n'ont pas eu la bombe**

Manfred Popp

Hitler n'a pas eu la bombe. Par manque de moyens, disent certains historiens; parce que ses physiciens l'ont sciemment évitée, selon d'autres. L'examen des textes et des actes des chercheurs avec un œil de physicien nucléaire suggère que la vérité, bien plus subtile, est intermédiaire.

Rendez-vous

78 **Logique & calcul**

Vers du calcul sans coût énergétique

Jean-Paul Delahaye

Les petits calculs nécessitent un minimum d'énergie. Mais la maîtrise du calcul réversible pourrait rendre caduc cet obstacle.

84 **Science & fiction**

Un sommeil de glace

J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq

86 **Art & science**

Les données, objets d'art

Loïc Mangin

89 **Idées de physique**

Le doigt, un capteur universel

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



92 **Question aux experts**

Pourquoi le ciel nocturne est-il noir et non pas brillant ?

Karen Kwitter

94 **Science & gastronomie**

Imperméabilité au gras

Hervé This

96 **À lire**

98 **Bloc-notes**

Les chroniques de Didier Nordon

SCIENCE.fr

LETTRE D'INFORMATION



Ne manquez pas
la parution
de votre magazine
grâce à la NEWSLETTER

- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque



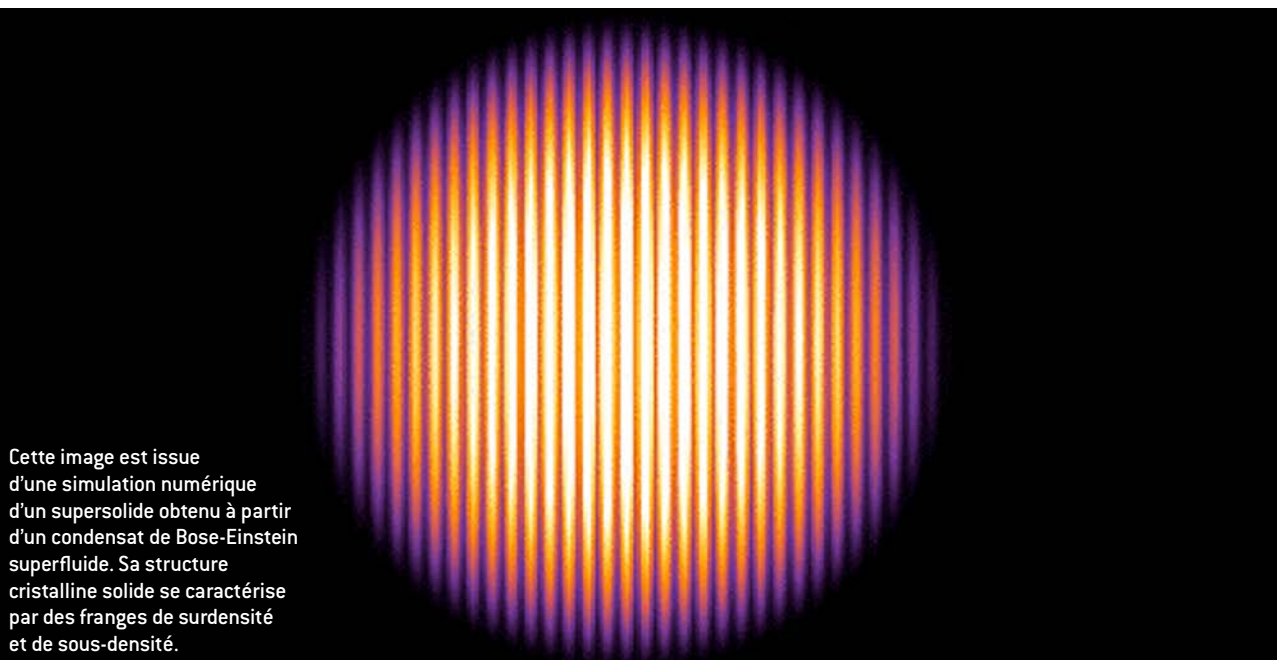
Recevez gratuitement la lettre d'information
en inscrivant uniquement votre adresse mail
sur www.pourlascience.fr

Actualités

Physique

Un supersolide créé pour la première fois en laboratoire

Dans un gaz refroidi au zéro absolu ou presque, des physiciens ont créé un état de la matière étonnant, à la fois superfluide et solide, prédit il y a près de cinquante ans.



Cette image est issue d'une simulation numérique d'un supersolide obtenu à partir d'un condensat de Bose-Einstein superfluide. Sa structure cristalline solide se caractérise par des franges de surdensité et de sous-densité.

© F.L. Ho et al/Physical Review Letters 2017

Nombre de phénomènes de la physique quantique semblent paradoxaux. L'état supersolide en est un exemple. Il s'agit d'un cristal solide qui présente dans certaines conditions les propriétés d'un superfluide : ainsi, une impureté le traverserait sans subir de force de frottement, malgré la rigidité du solide. Imaginés dans les années 1960, de tels supersolides peuvent-ils réellement exister ? Deux équipes, au MIT (l'institut de technologie du Massachusetts) et à l'École polytechnique fédérale de Zurich, ont réussi à en créer une forme à partir de condensats de Bose-Einstein.

Les condensats de Bose-Einstein sont des états de la matière où les atomes se retrouvent tous dans le même état quantique, ce qui leur confère des propriétés

collectives particulières. Le phénomène a été prédit en 1925 par Albert Einstein à partir des travaux de Satyendranath Bose. Le condensat de Bose-Einstein le plus connu est l'hélium 4 porté à une température inférieure à 2 kelvins (-271°C) : ce gaz devient un superfluide, c'est-à-dire que les frictions disparaissent et sa viscosité s'annule. D'autres types de condensats de Bose-Einstein sont obtenus à partir de nuages dilués d'atomes refroidis par des lasers. Wolfgang Ketterle a été récompensé du prix Nobel en 2001 pour ses travaux sur de tels systèmes ; il dirige l'équipe du MIT qui vient de réaliser un supersolide.

L'idée de supersolide a été proposée dès 1969 par les théoriciens russes Alexander Andreev et Ilya Lifshitz, le Britannique

David Thouless (prix Nobel de physique en 2016) et d'autres. Pour en réaliser un, la première piste a été de partir de l'hélium 4. À basse température, son état quantique l'empêche de geler, à moins d'appliquer une pression élevée. Les atomes s'ordonnent régulièrement et forment un réseau cristallin, mais ce solide est très souple, car le réseau contient de nombreux trous, ou lacunes. Or d'après les théoriciens, ces lacunes se déplacent dans l'hélium 4 solide de façon cohérente et sans frottement, comme dans un superfluide. On aurait ainsi un comportement de supersolide.

L'hélium 4 supersolide n'a cependant jamais pu être mis en évidence en laboratoire, malgré plusieurs annonces, qui n'ont pas résisté à des analyses méticuleuses.

Les condensats de nuages d'atomes froids sont plus facilement contrôlables que l'hélium 4 superfluide, en particulier grâce à l'utilisation de lasers. Un autre avantage est qu'ils se prêtent très bien aux observations. Wolfgang Ketterle et son équipe, ainsi que Tilman Esslinger et son groupe à Zurich, ont donc utilisé de telles assemblées d'atomes froids.

La première équipe a créé, à l'aide de lasers, des ondes dans un gaz d'atomes de sodium. Les atomes se répartissent alors en régions de surdensité et en régions de sous-densité, qui forment ainsi des stries régulièrement espacées.

L'équipe de Tilman Esslinger a utilisé une autre technique. Un gaz d'atomes de rubidium est placé entre deux cavités optiques encadrées par des miroirs formant un angle de 60 degrés. À

Biomédecine

Un intestin humain fonctionnel reconstitué

L'intestin comporte son propre système nerveux, dit entérique, qui contrôle de nombreuses fonctions du tube digestif. Avec l'aide d'une équipe de l'université de Nantes (Inserm U913), des biologistes de l'hôpital des enfants de Cincinnati ont construit un intestin fonctionnel à partir de cellules souches humaines. L'éclairage de Maxime Mahé, coauteur des travaux.

cela s'ajoute un faisceau laser qui interagit avec les atomes. Ces derniers s'organisent alors, mais deux symétries mathématiques du superfluide et de son réseau cristallin se voient perturbées par les cavités de façon bien précise. C'est exactement ce que cherchaient à produire les physiciens, car la théorie montre qu'un superfluide devient supersolide à condition que deux types de symétrie du système soient brisées (l'expérience de Wolfgang Ketterle conduit également à des brisures de symétrie).

Ces deux expériences ont-elles vraiment obtenu des supersolides ? Leurs auteurs ont vérifié que les symétries en question étaient bien brisées, ce qui permet, conformément à la théorie, de qualifier ces phases de supersolides.

Cependant, pour certains chercheurs, le véritable défi serait de créer un supersolide avec de l'hélium 4, où les atomes sont en interaction plus intense et où la structure cristalline régulière (l'espacement entre les atomes) n'est pas imposée par un élément externe (la longueur d'onde du laser). Dans l'hélium 4, les choses seraient plus « directes » tout en restant fondamentalement équivalentes.

Reste que, comme le souligne Anatoly Kuklov, de l'université de Staten Island, ces deux résultats expérimentaux sont fantastiques et donnent déjà à voir un état de la matière étonnant où coexistent des propriétés de superfluidité et de solide. Un monde bien étrange que celui de la physique quantique !

Sean Bailly

J. Léonard et al., en ligne le 28 sept. 2016, <https://arxiv.org/abs/1609.09053> ;
L. Li et al., en ligne le 26 octobre 2016, <https://arxiv.org/abs/1610.08194>

Qu'apporte cette reconstitution par rapport aux précédentes ?

Maxime Mahé : Il y a eu en effet d'autres productions de tissus intestinaux, elles aussi réalisées dans notre groupe. Depuis la fin des années 2000, l'équipe travaillait sur la différenciation de l'endoderme, le tissu primaire qui donne naissance aux tissus intestinaux. Or en 2010, nous avons découvert comment des cellules souches pluripotentes (capables de se différencier en divers types de cellules) deviennent intestinales. Au fil des ans, nous avons amélioré le système. Au début, le tissu obtenu n'était pas innervé, mais aujourd'hui, il s'agit d'un tissu intestinal comportant un tissu neuronal, qui correspond au système nerveux entérique.

Comment avez-vous procédé ?

M. M. : On savait que le système nerveux entérique provient d'un autre tissu primaire – l'ectoderme, qui, comme l'endoderme, apparaît au tout début de l'embryogenèse. Nous avons créé un endoderme dans une boîte de culture et un ectoderme dans une autre, puis nous les avons rassemblés. Chaque cellule s'est placée dans une organisation quasi similaire à celle trouvée dans un embryon. Bien sûr à une échelle simplifiée, car les tissus primaires créés ne sont que bidimensionnels. En les combinant, on obtient

une sorte de sphéroïde creux de 1 à 2 millimètres dont l'intérieur est nappé de villosités telles celles qui constituent la paroi intestinale. Et autour, un tissu dit mésenchymateux maintient cet épithélium et est traversé de neurones.

Comment avez-vous testé sa fonctionnalité ?

M. M. : D'abord, *in vitro*, après avoir étudié sa morphologie et le type de cellules qui le composent, nous avons testé certaines fonctions du sphéroïde :



M. Mahé, Cincinnati Children's Hospital Medical Center.

ses capacités d'absorption et de digestion, l'activité neuronale... On s'est ainsi aperçu qu'il assimilait certains sucres et peptides, mais qu'il lui manquait des enzymes digestives essentielles. Peut-être n'était-il pas assez mature ? Mais le cultiver plus longtemps n'a rien changé. En revanche, transplanté dans une souris sans défenses immunitaires, il s'est développé et a acquis les enzymes manquantes. La prochaine étape sera de rattacher l'intestin de la souris à ce greffon, pour voir comment les microbes

et autres éléments intestinaux interagiront avec lui.

Quelles utilisations envisagez-vous ?

M. M. : Dès maintenant, ce mini-intestin peut servir de modèle pour tester comment des molécules passent cette barrière et ce qu'elles deviennent. En utilisant des cellules souches pluripotentes induites à partir de cellules de patients, on pourrait aussi produire des mini-intestins portant des mutations liées à une maladie digestive, voire étudier sa genèse en suivant le développement du tissu transplanté chez l'animal. *In vitro*, nous avons ainsi recréé des intestins qui présentent une mutation liée à la maladie de Hirschsprung, un trouble congénital de la motilité intestinale dû à un défaut de mise en place du système nerveux entérique. Les intestins produits avaient le même défaut.

Une transplantation serait-elle envisageable chez l'homme ?

M. M. : C'est en théorie envisageable : on pourrait créer un mini-intestin à partir des cellules du patient, utiliser ce dernier comme incubateur, c'est-à-dire transplanter le mini-intestin dans son corps pour qu'il se développe, et le greffer ensuite à son système digestif. Mais on en est encore très loin.

Marie-Neige Cordonnier

M. J. Workman et al., *Nature Medicine*, 21 novembre 2016

Neurobiologie

Comment le cannabis perturbe la mémoire

Le cannabis agit sur la mémoire en modifiant directement l'activité des mitochondries des cellules cérébrales, qui ne peuvent alors plus fonctionner.



© frikita / Shutterstock.com

53%

*C'est la proportion de personnes ayant consommé du cannabis plus de 25 fois au cours de leur vie qui déclarent avoir souffert à maintes reprises d'un manque de concentration et de troubles de la mémoire.**

Le cannabis est connu pour perturber la mémoire, à court et à long terme. On sait que dans le cerveau, son composé actif, le THC (delta9-tétrahydrocannabinol), se fixe sur des récepteurs dits cannabinoïdes, le récepteur CB1 en particulier, ce qui modifie l'activité des neurones et d'autres cellules cérébrales. Mais on ignorait à ce jour comment le THC altérait directement la mémoire. L'équipe de Giovanni Marsicano, du neurocentre Magendie de l'Inserm à Bordeaux, a probablement trouvé la réponse : le THC perturbe le fonctionnement des centrales énergétiques des cellules, les mitochondries.

Or sans énergie, pas d'activité. À l'intérieur des cellules, les mitochondries convertissent l'oxygène et les nutriments en énergie (sous forme d'ATP), nécessaire à tous les processus biochimiques. Lors de n'importe quelle tâche cognitive,

les neurones consomment de l'ATP pour s'activer, communiquer ou créer des connexions avec des neurones voisins. Le cerveau ne représente que 2 % du poids du corps, mais il consomme 25 % de son énergie ! Des anomalies des mitochondries sont associées à des troubles neurologiques et psychiatriques souvent graves. Mais on n'avait jamais directement démontré l'importance des mitochondries dans des fonctions cérébrales.

Giovanni Marsicano et son équipe ont fait d'une pierre deux coups. Ils ont découvert qu'il existe un récepteur du THC sur la membrane des mitochondries – nommé mtCB1. Ils ont alors créé des souris génétiquement modifiées pour ne plus exprimer ce récepteur sur les mitochondries des neurones de l'hippocampe, le centre cérébral de la mémoire. Pour ce faire, ils se sont servi d'un virus non pathogène portant un

gène qui modifie l'expression de mtCB1, et l'ont injecté dans l'hippocampe des souris.

Les chercheurs ont ensuite soumis ces rongeurs dépourvus de récepteur mtCB1 et des souris normales à une tâche de reconnaissance d'un nouvel objet, qui permet d'évaluer la mémorisation. Les animaux examinent deux objets dans une pièce pendant un certain temps, puis l'un des éléments est remplacé par un nouveau. Si leur mémoire fonctionne correctement, les souris passent plus de temps à observer ce nouvel objet que l'autre, qu'elles connaissent déjà. Si elles tournent autant autour des deux éléments, c'est que leur mémoire est déficiente. Enfin, Marsicano et ses collègues ont administré du THC à certaines souris des deux groupes.

Les résultats sont flagrants : le cannabis rend les souris normales amnésiques, mais pas celles qui n'ont plus de récepteur mtCB1 mitochondrial dans l'hippocampe. C'est la preuve que le THC altère directement l'activité des mitochondries, *via* mtCB1, et que les cellules de l'hippocampe n'ont alors plus assez d'énergie pour fonctionner. Et grâce à l'analyse de tranches d'hippocampe de ces souris, les neurobiologistes ont montré que ce sont bien les récepteurs mtCB1 qui perturbent les voies de signalisation mitochondriale, puis l'excitation des neurones.

Les mitochondries contribuent donc à la mémorisation en apportant l'énergie nécessaire au fonctionnement des neurones, et le cannabis bloque l'activité des mitochondries. Ainsi, de nouveaux acteurs cellulaires des fonctions cérébrales viennent d'être découverts.

Bénédicte Salthun-Lassalle

É. Hebert-Chatelain et al., Nature, en ligne le 9 novembre 2016

* Source : Expertise collective Inserm, 2001. Cannabis : quels effets sur le comportement et la santé

Physique

Le compactage de la neige

Avec précaution, vous posez un pied sur la neige, puis un autre; tout va bien; vous avancez et vous vous détendez et là, une prise d'appui un peu plus dure vous ayant échappé, votre pied s'enfonce; vous ne bougez pas, puis, doucement, appuyez sur l'autre pied. Trop fort: il s'enfonce et... vous vous retrouvez enfoncé jusqu'à la taille! C'est ce phénomène que l'équipe de Michael Zaiser, de l'université Friedrich Alexander d'Erlangen-Nuremberg, vient d'étudier expérimentalement.

De nombreux matériaux sont résistants lorsqu'on leur applique une déformation lente, mais fragiles quand cette déformation est rapide. La neige en fait partie: elle résiste d'abord à la pression, puis, celle-ci devenant trop forte, s'effondre localement d'un seul coup. Ce phénomène de seuil résulte de la rupture des ponts de glace entre grains, qui se ressolident ensuite en quelques secondes. Pour étudier le compactage produit après une telle rupture, les chercheurs



Quand on appuie lentement sur la neige, elle résiste jusqu'à un certain point. Mais lorsqu'on effectue des mouvements brusques, elle cesse d'opposer de la résistance.

ont réalisé des essais de compression dans une cuve à l'aide d'un piston avançant par incréments, en expérimentant avec toute une série d'échantillons de neige sèche, artificielle ou naturelle.

Qu'en ressort-il? Lorsque la neige cède à la pression, une bande de neige comprimée se forme, puis la compression se propage à vitesse constante vers le fond, où elle peut parfois se réfléchir et remonter. Les allers et retours de cette compression laissent l'échantillon compacté de façon assez homogène. Lorsque la contrainte extérieure est exercée plus vite (incrémentes rapides), la vitesse de propagation du front de compression augmente, mais la structure de l'échantillon après son passage reste la même. Finalement, une série d'essais avec des échantillons de neige âgée de cinq minutes à plus de trois jours a montré que la pression nécessaire pour déclencher le compactage augmente avec l'âge de la neige.

Ces résultats, décrits par un modèle physique, aideront à simuler les départs d'avalanche et les interactions des équipements hivernaux avec la neige.

François Savatier

T. W. Barraclough et al., *Nature Physics*, en ligne le 21 novembre 2016

Mégaséismes et géométrie

Dans les zones de subduction, les plaques océaniques très denses s'enfoncent sous les plaques continentales et provoquent parfois des mégaséismes (de magnitude supérieure à 8,5). Quentin Blettery, de l'université de l'Oregon, aux États-Unis, et ses collègues ont montré que la courbure de la faille de subduction joue un rôle primordial dans le déclenchement de mégaséismes.

Si une telle faille présente une courbure importante, les contraintes de cisaillement entre les plaques sont très hétérogènes sur toute l'interface. Cela permet une dissipation régulière et progressive de l'énergie mécanique accumulée lors de la subduction. Si la faille est plane (courbure nulle), les contraintes se répartissent de façon homogène. Un décrochage se fera alors brutalement sur une grande zone. L'événement sera plus ponctuel dans le temps et donc violent.

Au vu de la géométrie de leurs failles, l'Amérique du Sud, le Japon et l'Indonésie seraient donc particulièrement propices à des mégaséismes.

Astrophysique

Aux origines des anneaux de Saturne

Les anneaux de Saturne sont l'un des bijoux du Système solaire. Pour mieux comprendre leur origine, Sébastien Charnoz, de l'Institut de physique du globe de Paris, et ses collègues ont simulé la rencontre de la géante gazeuse avec des corps venant de la ceinture de Kuiper (au-delà de l'orbite actuelle de Neptune) il y a environ quatre milliards d'années.

Parmi les plus gros de ces corps, de masses proches de celle de Pluton, certains auraient croisé de près les planètes géantes. Et, soumis aux forces de marée de Saturne, ils auraient été disloqués.

Les chercheurs ont simulé ce scénario et montré que lors

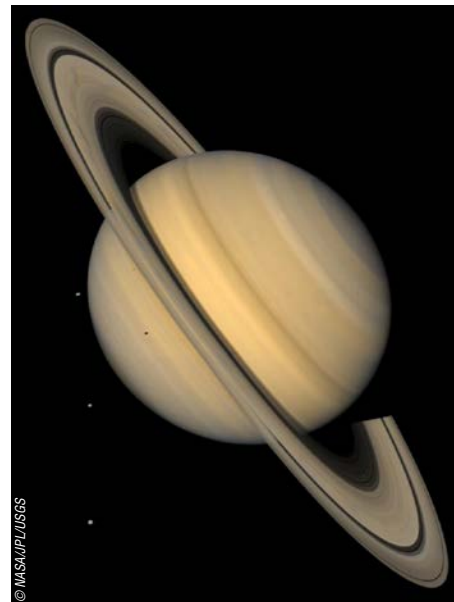
d'une telle rencontre, entre 0,1 et 10 % de la masse du corps est capturée en orbite autour de la planète géante. Ainsi, plusieurs dizaines de corps ont pu croiser le chemin de Saturne et contribuer à la masse de son anneau.

Après leur capture, les débris sont encore assez gros et ont des orbites très elliptiques. Les simulations effectuées par Sébastien Charnoz et ses collègues montrent que les débris subissent de nombreuses collisions, ce qui les réduit en fragments de plus en plus petits. La dissipation de l'énergie lors des chocs conduit aussi leurs orbites à devenir plus circulaires et à former *in fine* des anneaux.

Les chercheurs expliquent aussi pourquoi les anneaux de Saturne sont plus riches en glace d'eau (90 à 95 % de leur composition) que ceux d'Uranus. Du fait des densités différentes (0,69 gramme par centimètre cube pour Saturne et le double pour Uranus), un petit corps peut se rapprocher davantage d'Uranus sans s'abîmer sur la planète et subir des forces de marée plus intenses. Uranus a pu ainsi briser plus en profondeur les corps et atteindre leur noyau rocheux, alors que Saturne n'a détruit que leur surface glacée.

S. B.

R. Hyodo et al., *Icarus*, 15 janvier 2017



Une pince surpuissante

Le crabe des cocotiers, le plus grand arthropode terrestre, est aussi connu pour la puissance de ses pinces. Il les utilise pour se battre et se nourrir. Shin-ichiro Oka, de la fondation Churashima, à Okinawa, au Japon, et ses collègues ont déterminé la force maximale exercée par une pince de cet animal. En étudiant 29 crabes des cocotiers, ils ont montré que la force était proportionnelle à la taille de l'animal et ils ont estimé que les plus grands déployaient une force de 3300 newtons, ce qui leur permet d'être les consommateurs exclusifs de noix de coco.

Des galaxies énigmatiques

Les galaxies ultradiffuses sont un défi pour les astrophysiciens qui tentent de comprendre l'évolution des galaxies : elles contiennent jusqu'à 1 000 fois moins d'étoiles que la Voie lactée, mais sont aussi étendues. Arianna Di Cintio, de l'institut Niels Bohr, au Danemark, et ses collègues avancent une explication. Les galaxies ultradiffuses auraient contenu un grand nombre de supernovæ dans leur jeunesse : ces explosions d'étoiles auraient alors, en dispersant le gaz et la poussière de la galaxie, entravé leur agglomération et donc réduit la formation des étoiles.

Une symbiose ancienne

Guillaume Chomicki et Susanne Renner, de l'université de Munich, ont découvert aux îles Fidji une nouvelle symbiose entre des fourmis et six espèces de plantes du genre *Squamellaria* ; et ils estiment que ce partenariat date de près de trois millions d'années. Ces plantes sont épiphytes : elles utilisent comme support d'autres plantes, telles que des arbres. Les fourmis récoltent leurs graines et les insèrent dans l'écorce des arbres. Elles y déposent aussi leurs excréments, ce qui apporte des nutriments nécessaires à la plante. Les jeunes pousses forment ensuite des cavités qui servent d'habitat aux fourmis.

Physique

Un système quantique monté atome par atome

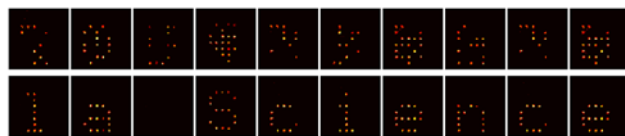
Est-il possible de construire des dispositifs quantiques dont la structure est contrôlée à l'atome près ? La réponse est oui : l'équipe de Thierry Lahaye et d'Antoine Browaeys, du laboratoire Charles Fabry à l'Institut d'optique (université Paris-Saclay), a mis au point un système rapide et performant pour construire atome par atome de tels systèmes.

L'objectif était de produire des matrices d'atomes régulièrement espacés, par exemple dans un plan. Les chercheurs ont utilisé des atomes de rubidium refroidis à une fraction de degré au-dessus du zéro absolu. Cela permet de maintenir une cohérence quantique pendant de longues durées. La matrice est obtenue à partir d'un faisceau laser mis en forme

pour créer des micropièges où vont se nicher les atomes.

Cependant, quand on injecte de façon aléatoire des atomes dans la matrice, le processus de remplissage n'est efficace qu'à 50 %. Pour remplir une matrice de N pièges sans trous, l'équipe de

configuration obtenue est enregistrée par une caméra CCD. Un programme analyse la disposition des atomes et détermine ceux qui doivent être déplacés pour former la matrice recherchée. Pour bouger les atomes un par un, les chercheurs font appel à la tech-



© D. Barredo et al.

Sur ces vignettes, les atomes de la rangée du haut (observés par fluorescence) ont été redispuestos un par un (en bas).

L'Institut d'optique a commencé par une matrice plus grande, de $2N$ pièges, qu'elle remplit aléatoirement une fois avec N atomes. Une image de fluorescence de la

matrice de la pince optique, un laser qui piège un atome et l'entraîne lorsqu'on déplace le faisceau. Avec 50 atomes, la matrice désirée est obtenue en moins d'un dixième de seconde.

S. B.

D. Barredo et al., *Science*, en ligne le 3 novembre 2016

Insolite

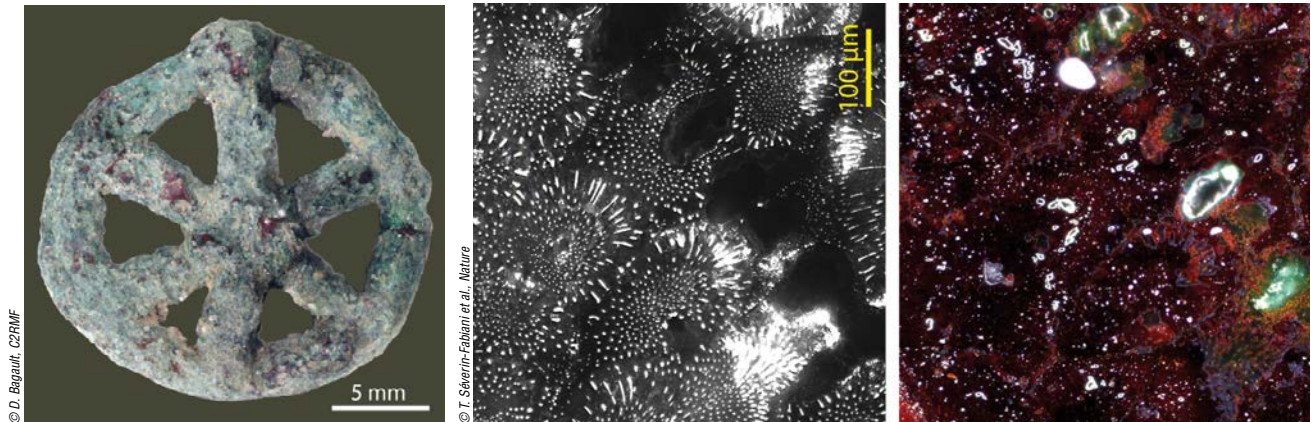
Un penseur peut être une cruche

Pourquoi portons-nous facilement la main à la tête quand nous réfléchissons ? Ce geste accompagnant un regard intérieur est très ancien sans doute. Il fascinait déjà les Levantins de l'âge du Bronze moyen : menée par l'Autorité israélienne des antiquités, la fouille d'une nécropole de cette période au centre de la ville de Yehud a livré un bec de cruche rappelant *Le Penseur* de Rodin. Un penseur vieux de presque 4000 ans !



© Autorité israélienne des antiquités

Archéologie



SOLEIL fait la lumière sur la cire perdue

Au synchrotron SOLEIL, en utilisant l'imagerie par photoluminescence, des chercheurs ont décrypté la fabrication du plus ancien objet métallique fondu par la technique de la cire perdue.

La cuprite, de formule Cu_2O , est le principal produit de l'oxydation du cuivre. En exploitant sa semiconductivité, une équipe menée par Loïc Bertrand, du synchrotron SOLEIL, et par Benoît Mille, du Centre de recherche et de restauration des musées de France, vient de révéler comment, à la fin du V^e millénaire avant notre ère, la plus ancienne cire perdue de l'humanité fut coulée.

Ce procédé de fonderie consiste à construire un modèle de cire de l'objet à réaliser, à le recouvrir d'argile, puis à le faire cuire en ayant prévu un trou pour que la cire fondue s'écoule. On obtient ainsi un moule dans lequel on peut couler du métal, ce qui donne, après refroidissement, l'objet final.

Les chercheurs ont étudié une rouelle, c'est-à-dire l'une de ces amulettes métalliques en forme de petite roue à rayons très utilisées pendant les âges métallurgiques pour faire des offrandes. Aujourd'hui, elle se présente sous la forme d'une petite masse corrodée large de deux centimètres entièrement en cuprite. Découverte en 1985 sur le site de Mehrgarh, à l'ouest de la vallée de l'Indus, elle date de

l'âge du Cuivre, le premier des âges métallurgiques, qui, dans cette région, s'étend de 4500 à 3600 avant notre ère.

L'étude de cette rouelle dans les années 2000 avait déjà révélé sa production à la cire perdue. Pour en préciser les modalités, les chercheurs ont tiré parti d'une propriété des semiconducteurs : la photoluminescence. En éclairant la rouelle avec une lumière d'énergie suffisante, ils ont déclenché l'émission de lumière par la cuprite. Cette lumière leur a permis de faire des analyses spectroscopiques et d'enregistrer des images très précises, dans le proche infrarouge, des défauts cristallins de la cuprite.

Les résultats confirment que la forme complexe de la rouelle a bien été coulée en un seul tenant, comme on le pensait. Ils montrent ensuite que le cuivre employé, probablement trouvé en pépites dans la nature, était particulièrement pur. Toutefois, les chercheurs ont été surpris de découvrir dans les images de photoluminescence (*ci-dessus*) des structures en bâtonnets, qui prouvent que des inclusions de cuprite ont été prises dans la masse de la rouelle dès son coulage. L'équipe de recherche en a déduit que l'atmosphère du

four où le cuivre fut fondu était oxydante. Ce four devait donc être assez rudimentaire. Dans les fonderies d'aujourd'hui, on fond en effet le métal dans une atmosphère non oxydante, afin d'éviter la formation d'oxydes.

En outre, l'observation à différentes échelles du matériau a montré que le mélange de cuprite et de cuivre d'origine a fondu à une température précise, qui a pu être déterminée à un degré près, ainsi que la température de solidification.

La réalisation d'une rouelle en cuivre pur étonne, car l'archéologie suggère que la cire perdue n'a été vraiment adoptée qu'après la mise au point d'alliages faciles à couler. De fait, les plus anciens objets complexes coulés par cire perdue connus avant la découverte de la rouelle, ceux de Nahal Mishmar, en Israël, ont été formés dans un alliage cuivre-arsenic. À Mehrgarh, les chercheurs ont constaté qu'un alliage très particulier de cuivre riche en plomb apparaît au cours de l'âge du Cuivre. Ainsi, l'emploi de cuivre pur pour produire la rouelle apparaît en quelque sorte comme une erreur de débutant...

F.S.

*Nature Communications,
en ligne le 15 novembre 2016*

La rouelle de Mehrgarh (à gauche) est, avec d'autres objets découverts en même temps, le plus ancien exemple d'utilisation de la technique de la cire perdue. Une image de l'intérieur de la rouelle obtenue par photoluminescence à haute dynamique spatiale (au milieu) révèle une structure en bâtonnets invisible autrement. Elle est comparée à une image du même endroit obtenue par microscopie optique (à droite).