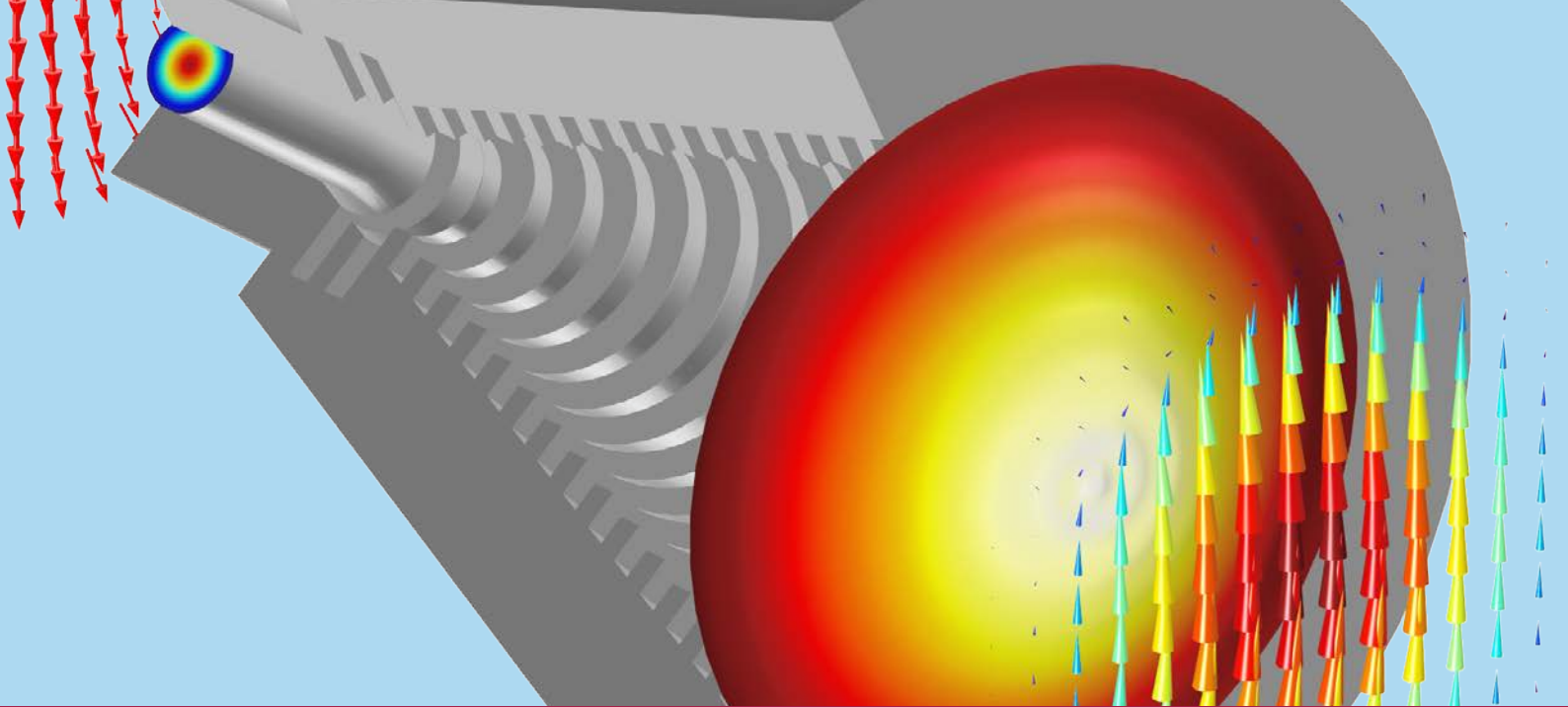


SCIENCE

www.pourlascience.fr

Les nouveaux venus de la physique des particules





LA MULTIPHYSIQUE POUR TOUS

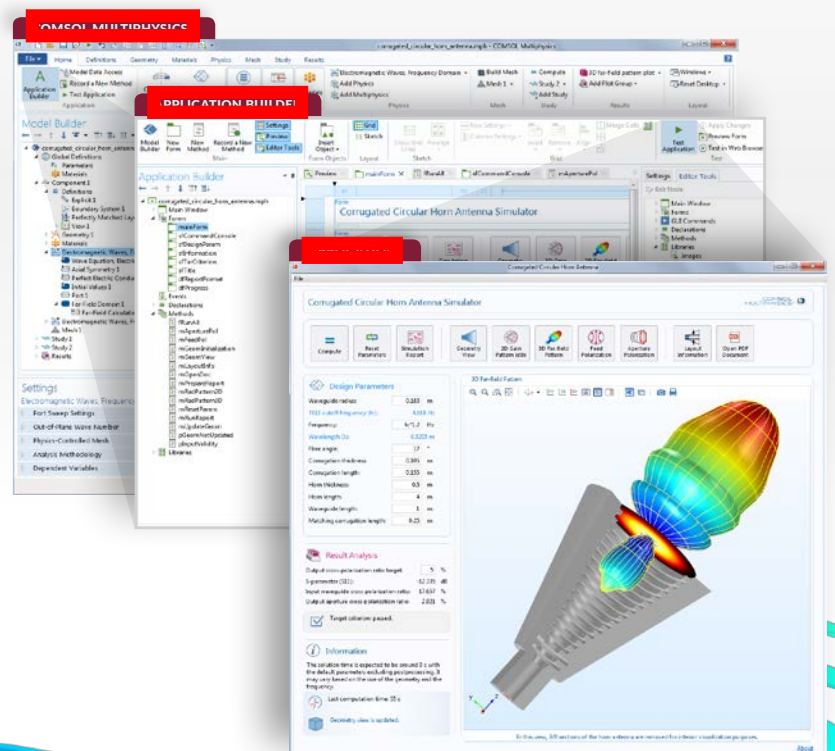
L'évolution des outils de simulation numérique vient de franchir un cap majeur.

Des applis spécialisées sont désormais développées par les spécialistes en simulation avec l'application Builder de COMSOL Multiphysics®.

Une installation locale de COMSOL Server™, permet de diffuser les applis dans votre organisme et dans le monde entier.

Faites bénéficier à plein votre organisme de la puissance de l'outil numérique.

comsol.fr/application-builder



POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

3 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Tel : 01 55 42 84 01

GROUPE POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaa

Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Jean 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,

Jurélien Perrin, Christophe Pichon, Anthony Sladen,

Daniel Jacquenet

PRESSE ET COMMUNICATION

Josuan Mackie

josuan.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

BONNEMENTS

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

Courriel : pourlascience@abopress.fr

Téléphone : 03 67 07 98 17

Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science

39 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,

28 avenue du grain d'or, 41350 Vineuil

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

DIFFUSION

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tél. : 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 :

Nicky 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 inter-

dit 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 Mashaa
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 propose 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.

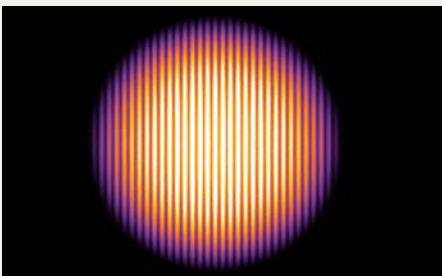
De nouvelles naissances dans la grande famille des hadrons

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 Volschin 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. ■

Actualités

Un supersolide créé pour la première fois en laboratoire



Un intestin humain fonctionnel reconstitué

Comment le cannabis perturbe la mémoire

SOLEIL fait la lumière sur la cire perdue

Des nouveaux atomiques qui font des bulles

Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

Réflexions & débats

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

Alain Fuchs

Cabinet de curiosités sociologiques J'en étais sûr !

Gérald Bronner

Homo sapiens informaticus

Les ordinateurs, rois de la mise en abyme

Gilles Dowek



Le numéro comporte une offre de parrainage *Pour la Science* sur une sélection d'abonnés de France métropolitaine. In 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 les 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 les formes de vie extraterrestre.



ÉTHOLOGIE

Christie Wilcox

PALÉONTOLOGIE

Daniel Ksepka et Michael Habib

BIOLOGIE

Paul Adler et Jeremy Nathans

HISTOIRE DES SCIENCES

Manfred Popp

78

Vers du calcul sans coût énergétique

34

Un sommeil de glace

36

Les données, objets d'art

39

Le doigt, un capteur universel

A blue-toned illustration of a man and a woman looking at a large stack of books. The man, on the left, is wearing glasses and a light-colored jacket, leaning over the books. The woman, on the right, is wearing a dark top and looking down at the books. The books are stacked high, with some open and some closed, showing various covers and pages.

92

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

94

Imperméabilité au gras

96

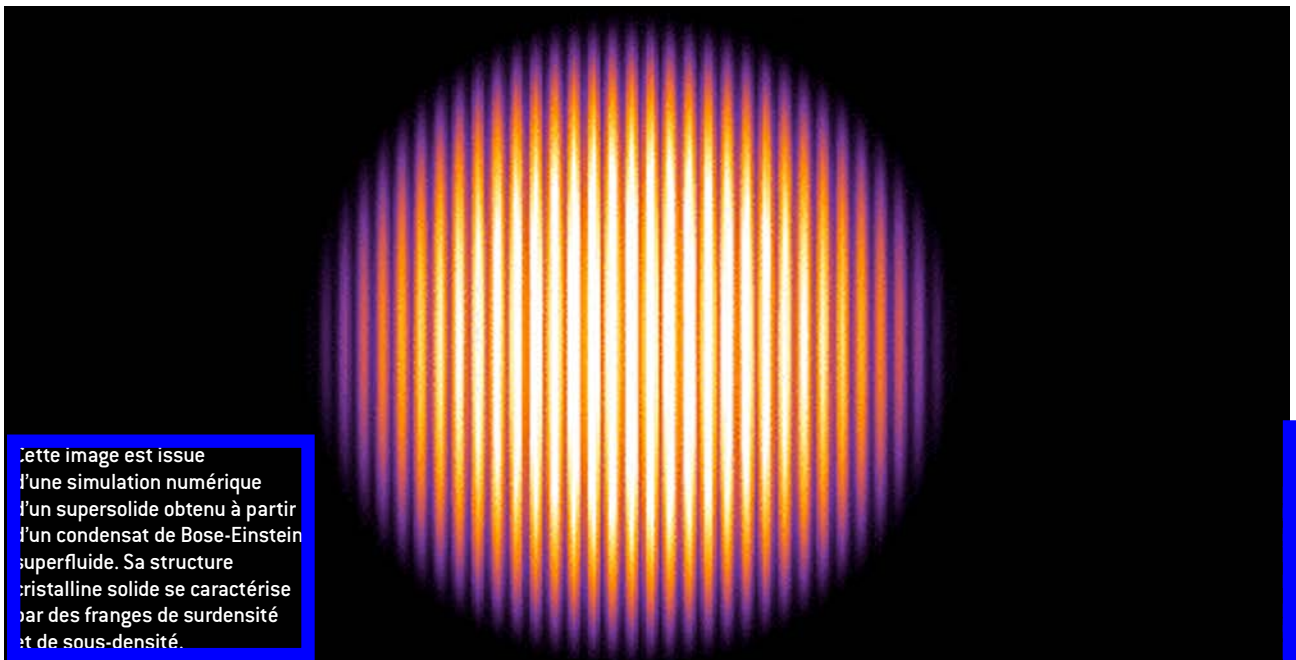
98

Les chroniques de Didier Nordor

Actualités

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.

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 ses frictions disparaissent et sa viscosité s'annule. D'autres types de condensats de Bose-Einstein ont été 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 Il'ya 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, il faut au 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

Biomedecine

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), les 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.

ela 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 la 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 les propriétés de superfluidité et de solide. Un monde bien étrange que celui de la physique quantique !

Sean Baillly

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 par les 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 les 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 dans son système digestif. Mais on en est encore très loin.

Marie-Neige Cordonnier

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

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.



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, 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 les 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 du 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.

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

Les chercheurs ont ensuite soumis ces rongeurs dépourvus du 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

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. Le 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.

Ils 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 aissent l'échantillon compacté de façon assez homogène. Lorsque la contrainte extérieure est exercée plus vite (incréments 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 Bletery, 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

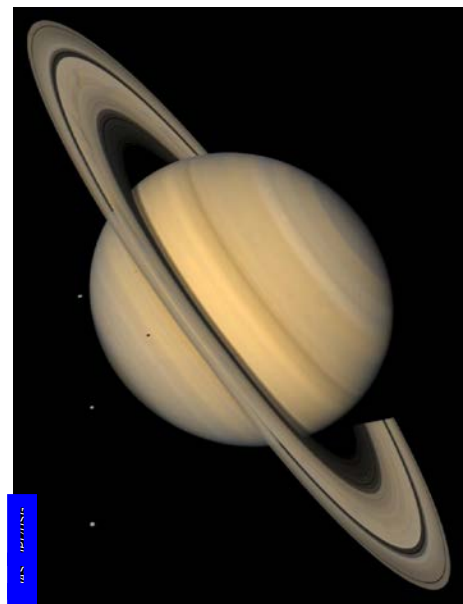
d'une telle rencontre, entre 0,1 et 10 % de la masse du corps est capturée en orbite autour de la planète géante. Ainsi, plusieurs dizaines de corps ont pu croiser le chemin de Saturne et contribuer à la masse de son anneau.

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 la fine des anneaux.

Les chercheurs expliquent aussi pourquoi les anneaux de Saturne sont plus riches en glace que ceux d'Uranus (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. Huado et al., *Icarus*, 15 janvier 2017



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

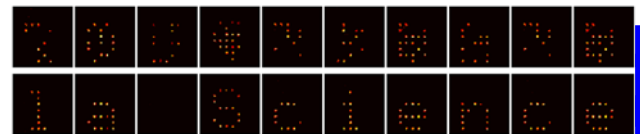
pour créer des micropièges où vont se nicher les atomes.

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 pousser les atomes un par un, les chercheurs font appel à la technique



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

nique 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

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 : les 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 *Squamularia* ; 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 les nutriments nécessaires à la plante. Les jeunes pousses forment ensuite des cavités qui servent d'habitat aux fourmis.

Insolite

Un penseur peut être une cruche

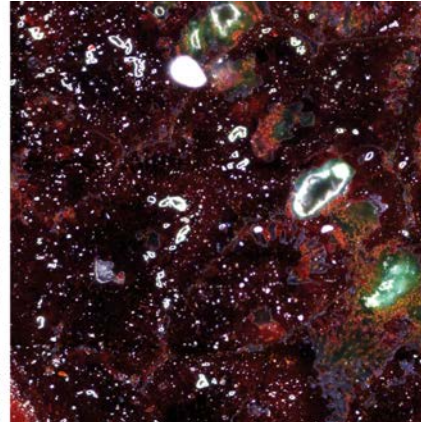
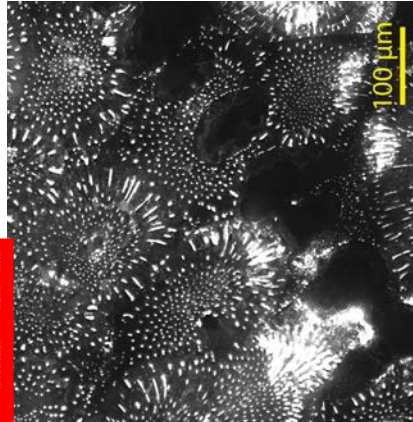
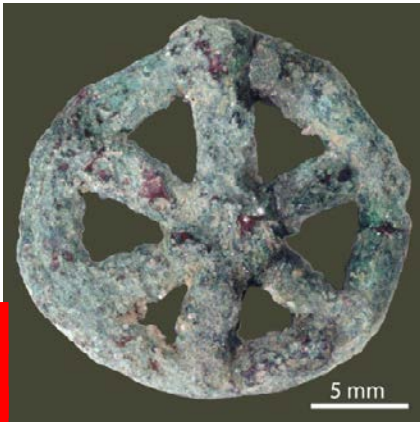
Pourquoi portons-nous facilement la main à la tête quand nous réfléchissons ? Le geste

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 !



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 7^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 quelques 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 la 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.

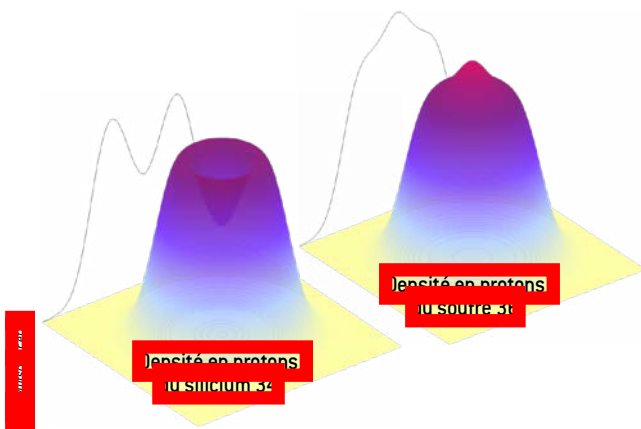
La réalisation d'une rouelle en cuivre pur étonne, car l'archéologie suggère que la cire perdue n'a été vraiment adoptée qu'après la mise au point d'alliages faciles à couler. De fait, les plus anciens objets complexes coulés par cire perdue connus avant la découverte de la rouelle, ceux de Nahal Mishmar, 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 de l'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).

Physique nucléaire



Des noyaux atomiques qui font des bulles

Certains noyaux exotiques présenteraient un creux en leur centre. Après quarante ans de recherche, l'existence de ces « noyaux bulles » vient d'être confirmée expérimentalement.

On se représente souvent les noyaux atomiques comme des amas sphériques de protons et neutrons. Pourtant, ils prennent parfois des formes étonnantes : en poire, en cigare, etc. Dans toutes ces configurations, le cœur du noyau est dense. Dès les années 1970, cependant, il a été suggéré que certains noyaux pouvaient avoir un cœur appauvri en protons et former des noyaux « bulles ». Un tel noyau a été mis en évidence par l'équipe d'Olivier Sorlin, chercheur au Ganil du Grand accélérateur national d'ions lourds, à Caen).

L'existence des noyaux bulles a été longtemps considérée comme peu probable au regard des modèles décrivant la matière nucléaire. La structure nucléaire est surtout définie par l'interaction forte qui lie les protons aux neutrons. Les propriétés de cette force sont telles que la densité est uniforme et quasi universelle au cœur de tous les noyaux connus : environ 0,16 nucléon par femtomètre cube (soit une densité de 200 millions de tonnes par centimètre cube). Cette densité est quasi constante jusqu'à la

périphérie du noyau, où elle chute rapidement.

Quelques noyaux exotiques découverts par la suite, tels que les noyaux à halo, échappent à cette description. Mais qu'en était-il des noyaux bulles ? Si l'on considère que les protons et les neutrons du noyau atomique sont des objets quantiques, leurs probabilités de présence dans le volume du noyau se déduisent de leurs fonctions d'onde. Dans certains cas, elles s'annulent au centre du noyau. Des calculs prévoient que le silicium 34 présentait une déplétion en protons au centre de 40 % par rapport au soufre 36, qui a deux protons de plus que le silicium 34. Mais ces résultats dépendaient du modèle théorique utilisé, et il était donc crucial de les mettre à l'épreuve.

En analysant des données de collisions et de désintégrations au laboratoire américain du cyclotron supraconducteur de l'université de l'État du Michigan, Olivier Sorlin et ses collègues ont comparé la structure du silicium 34 et du soufre 36. Ils ont montré que les deux protons manquants du silicium sont ceux qui occupent

précisément le cœur du noyau de soufre. Le silicium présente donc un déficit de protons en son cœur : il s'agit bien d'un noyau bulle.

Les perspectives de l'étude des noyaux bulles sont nombreuses. Par exemple, les noyaux sont en général si denses qu'ils sont considérés comme très difficilement compressibles. Avec sa structure de noyau bulle, le silicium 34 présenterait un mode de compression tout à fait unique.

Par ailleurs, le silicium 34 n'est peut-être pas le seul noyau où la densité est atypique. Selon certains modèles, les noyaux superlourds présenteraient une « peau de neutrons » telle que la densité de neutrons à la surface du noyau serait caractérisée par une décroissance lente plutôt qu'abrupte. Au Ganil, le nouvel accélérateur d'ions Spiral2 a été inauguré le 3 novembre 2016. Il est dédié à l'étude de la structure de tels noyaux et révélera sans doute de nouvelles structures tout aussi exotiques dans les années à venir.

S. B.

A. Mutschler et al., *Nature Physics*, en ligne le 24 octobre 2016

Le noyau atomique du silicium 34 est étonnant : sa densité en protons (graphique à gauche) présente un déficit vers le centre du noyau, en comparaison avec un noyau plus classique tel que le soufre 36. Cette structure exotique de « noyau bulle » vient d'être mise en évidence. Au Ganil, à Caen, le nouvel accélérateur d'ions Spiral2 (ci-dessus à droite, quelques-uns de ses aimants de focalisation) permettra de rechercher d'autres noyaux bulles parmi les éléments superlourds.

Chimie

Du phosphate à l'ARN

Les premières formes de vie seraient-elles essentiellement fondées sur l'acide ribonucléique (ou ARN)? Cette hypothèse repose sur les remarquables propriétés de cette macromolécule, capable de servir à la fois de support de l'information génétique (rôle surtout assuré par l'ADN aujourd'hui) et de catalyseur des réactions indispensables au développement de l'organisme (comme les protéines aujourd'hui). Elle se heurte néanmoins au « problème du phosphate ». Les ions phosphate sont indispensables à la constitution de l'ARN, où ils servent de lien entre ses nucléosides. Or ces ions sont très rares en condition abiotique, car ils forment rapidement un minéral stable en présence de calcium, l'hydroxapatite.

Au lieu d'imaginer des conditions permettant à cette roche de libérer des ions phosphate, l'équipe de Steven Benner, de l'entreprise Firebird Biomolecular Sciences, en Floride, a recherché d'autres minéraux susceptibles de phosphoryler les nucléosides : la lüneburgite serait un excellent candidat.

Constituée de magnésium, de borate et de phosphate, la lüneburgite se forme lors de l'évaporation d'eau riche en ces composés. Reproduisant en laboratoire un simple cycle de précipitation et d'évaporation tel qu'on peut l'observer en milieu désertique, les chimistes ont mis en présence une solution aqueuse contenant des nucléosides avec de la lüneburgite, avant de faire évaporer l'eau résiduelle. Après 16 heures, 15 % des nucléosides étaient phosphorylés. Le mécanisme de cette réaction s'effectue en deux temps : les nucléosides déstabilisent tout d'abord la lüneburgite en se liant aux borates, ce qui provoque la libération des ions phosphate. Ceux-ci peuvent alors se fixer sur les nucléosides à leur tour. « Cette étude montre tout l'intérêt du bore en chimie prébiotique, dont le rôle est probablement négligé », estime Laurent Boiteau, chimiste du CNRS à Montpellier.

Une interrogation subsiste néanmoins. Le bore est un élément rare, et le contexte géologique lors de l'apparition des premières formes de vie, il y a 3,8 milliards d'années, est différent de celui que l'on connaît aujourd'hui : y avait-il réellement de la lüneburgite à cette époque? Cette roche se dégradant facilement, il n'en reste pas de trace. Pour Steven Benner et ses collaborateurs, il existe cependant des indices. En effet, elle se décompose en tourmaline, apatite et monazite. Or ces minéraux ont justement été retrouvés dans des échantillons du Groenland datant d'environ 3,8 milliards d'années.

Martin Tian

H.-I. Kim et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, en ligne le 9 novembre 2011

Biologie végétale

Plants de tabac dopés

En modifiant des plants de tabac, Johannes Kromdijk, de l'université de l'Illinois, et ses collègues ont accéléré leur

croissance dans des conditions de culture en plein champ : après 22 jours, le poids à sec des plants modifiés était de 14 % à 20 % plus élevé que celui des plants non modifiés. Les biologistes ont augmenté l'efficacité de la photosynthèse non pas en élevant sa cadence, mais en optimisant son délai de mise en route.

La photosynthèse, avec l'aide du soleil, transforme en glucides le dioxyde de carbone fixé par la plante et l'eau absorbée. Toutefois, ce n'est pas parce que les plantes ont besoin du soleil pour croître qu'elles ne risquent pas de brûler sous ses rayons. Au fil de l'évolution, elles ont ainsi développé un mécanisme de protection solaire – un mécanisme qui, en cas d'excès, dissipe sous forme de chaleur une partie de l'énergie lumineuse reçue. Mieux, ce

processus se déclenche dès que la plante est trop exposée et s'arrête lorsqu'un nuage passe ou quand une feuille s'ombrage une autre.

Pendant l'arrêt prend quelques minutes à quelques heures, ce qui n'est pas anodin. En effet, d'après des simulations, une plante fixe sur une journée entre 7,5 % et 30 % de dioxyde de carbone en moins que si la protection solaire se levait sans délai. Les biologistes ont donc eu l'idée d'augmenter la production de protéines impliquées dans la levée de la protection. À cette fin, ils ont introduit dans le génome du tabac des copies supplémentaires de trois gènes codant ces protéines, issues d'une autre plante, l'arabette des dames. Ces travaux auront-ils une quelconque utilité pour répondre aux besoins alimentaires de la population mondiale croissante, comme le suggèrent leurs auteurs? Rien n'est moins sûr.

M.-N. C.

Science, vol. 354, pp. 857-861, 2016



En cas de fort ensoleillement, les plantes se protègent en dissipant sous forme de chaleur l'excès d'énergie solaire reçue. Des biologistes ont joué sur ce mécanisme pour accélérer la croissance de plants de tabac.

Le cœur de glace de Pluton

La surface de Pluton présente une région de couleur claire en forme de cœur. Des astrophysiciens ont utilisé les données de la sonde *New Horizons* pour étudier une zone de son pôle gauche, surnommée Sputnik Planitia. Il s'agit d'une dépression remplie de cristaux de dioxyde de carbone et d'azote qui se sont condensés dans cette région froide, âgée de dix millions d'années. En réfléchissant mieux la lumière du Soleil, son refroidissement s'est accentué, d'où l'accumulation de cristaux.

Les astrocytes ouvrent l'appétit

Notre appétit est contrôlé par différents neurones du noyau arqué de l'hypothalamus. Naiyan Chen, du MIT, et ses collègues ont découvert un nouvel acteur : les cellules gliales, et en particulier les astrocytes, des cellules cérébrales non neuronales. Ils ont montré que des rongeurs mangeaient

davantage que les souris témoins si les astrocytes de leur noyau arqué étaient activés (par génie génétique), mais moins s'ils étaient bloqués (avec des drogues). Dans le premier cas, les neurones stimulant l'appétit étaient aussi excités. Moduler l'activité des astrocytes serait donc une piste possible pour traiter l'obésité.

Suivez les dernières actualités de Pour la Science sur les réseaux sociaux



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Recherche : la France n'investit plus assez pour garder son rang

Fauteuil ou strapontin ? Quelle place notre pays veut-il occuper demain sur la scène scientifique mondiale ? La question se pose aujourd'hui alors que la stagnation des budgets nous affaiblit peu à peu dans un contexte international de plus en plus compétitif.

Alain FUCHS

Décembre a été un mois faste en célébrations pour la recherche française. On l'a vue briller à Stockholm lors de la cérémonie de remise du prix Nobel de chimie à notre collègue Jean-Pierre Sauvage, couronné avec J. Fraser Stoddart et Bernard L. Feringa pour leurs travaux sur la conception et la synthèse de machines moléculaires. Elle a été célébrée sous les ors de la Sorbonne à Paris à travers Claire Voisin, une grande mathématicienne au sein d'une communauté française de tout premier rang mondial, qui vient de se voir décerner la médaille d'or 2016 du CNRS.

L'excellence scientifique, dans notre pays, n'est pas un mot creux : elle est incarnée et bien vivante. Ces exemples, et bien d'autres encore, comme le rang que tiennent les opérateurs scientifiques nationaux (CNRS, Inserm, CEA) dans des classements tels que Nature Index ou le Reuters Top25 Global Innovators, montrent que la France occupe une place à part entière sur la scène scientifique mondiale. Une place de choix et pas un strapontin. Mais pour combien de temps encore ?

Car la question qui se pose est bien de savoir si la recherche française va se maintenir à ce niveau ou si elle va décrocher. Quand la Corée, « jeune » pays en matière de recherche de base, a augmenté la part de son PIB consacrée à la recherche de 2,63 % en 2005 à 4,29 %

en 2014, notre vieux pays est à la peine en enregistrant une augmentation de 2,04 % à 2,24 % sur la même période, selon la Banque mondiale. Tandis que, le 3 novembre dernier, le président François Hollande estimait tout juste « atteignable et réaliste » l'objectif des 3 % du PIB d'ici à dix ans.

Outre que cette perspective nous éloigne de celle fixée par la stratégie Horizon 2020, qui prévoit que l'Union européenne consacre 3 % de son PIB à la recherche en 2020, signalons que notre voisin allemand, doté d'un budget dédié à la recherche qui a bondi de 75 % en dix ans, n'est déjà quasiment parvenu. Si ce

Les prix Nobel d'aujourd'hui résultent des investissements d'hier

Cap est maintenu, les dépenses de recherche en Allemagne atteindront alors près de 4 %, creusant encore l'écart avec la France.

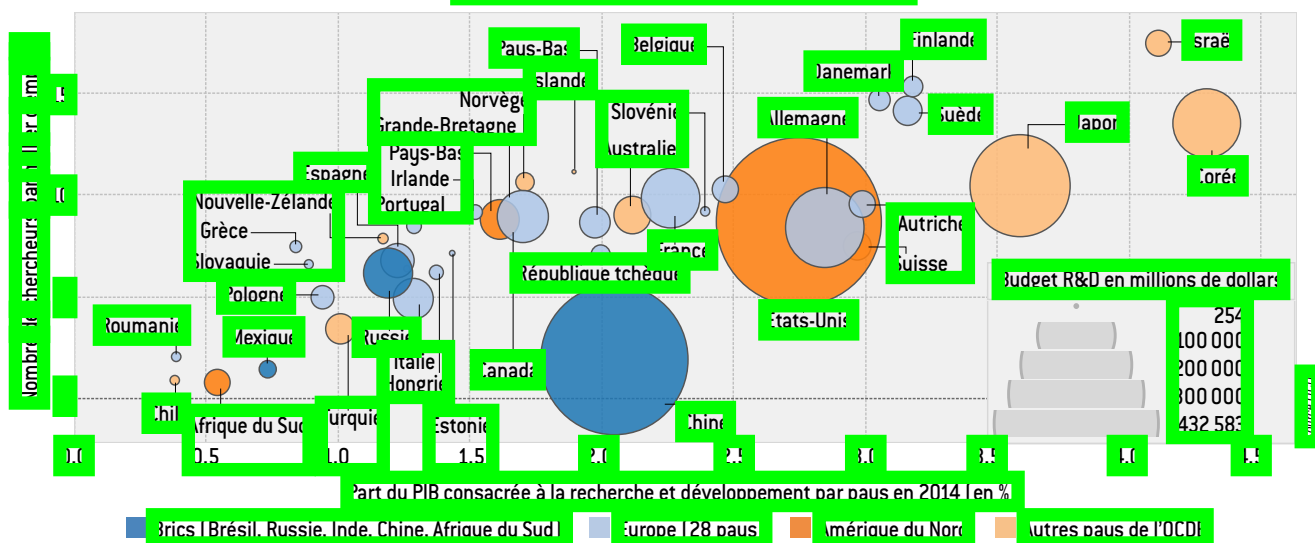
Force est de constater que la « priorité à la recherche » et la « sanctuarisation » des budgets invoquées dans les discours ont souvent du mal à se frayer un chemin dans la réalité. En période de contraintes budgétaires, la tentation est forte de rogner dans nos enveloppes, en laissant entendre dans l'opinion que les organismes de recherche disposent d'un « matelas » financier. L'épisode de l'annulation de crédits traversé il y a quelques

mois en témoigne : l'émotion de huit grands scientifiques français estimant, dans une tribune publiée par *Le Monde* le 23 mai 2016, qu'une perte sèche de 256 millions dans les laboratoires fragiliserait la recherche pour de longues années a contraint le gouvernement à renoncer à son projet.

Mais la tentative montre la précarité de notre édifice. Elle montre aussi que le maintien du budget de l'enseignement supérieur et de la recherche en France, si souvent évoqué, aboutit année après année à une stagnation dommageable dans un contexte de compétition internationale qui s'accroît à mesure des enjeux. Cette année encore, l'augmentation de 850 millions d'euros concédée au budget de l'enseignement supérieur et de la recherche permet essentiellement d'assurer la hausse du point d'indice accordée aux fonctionnaires. Ces 850 millions ne changeront quasiment rien à la réalité des laboratoires.

Contraint de contenir l'évolution de sa masse salariale depuis 2010, le CNRS s'est fait fort de maintenir un recrutement honorable de 307 chercheur·es et de largement plus de 300 ingénier·es et technicien·es. Depuis six ans, je me suis battu pour continuer d'assurer le renouvellement des générations. Car fermer les portes des laboratoires, c'est décourager les jeunes qui veulent entreprendre des études scientifiques. C'est désespérer les

LA RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT PAR PAYS EN 2014



Jeunes docteurs et doctorants qui sont le carburant de la science, c'est nous priver de talents étrangers alors que tant de scientifiques brillants veulent nous rejoindre.

Mais cet effort a un prix : celui de limiter de manière drastique nos marges de manœuvre, portant ainsi atteinte à notre capacité de réponse dans des domaines nouveaux, émergents et souvent interdisciplinaires. Il généralise notre capacité unique de soutenir des projets risqués de long terme, à l'image des travaux qui ont valu leur Nobel à Jean-Pierre Sauvage (2016), Jules Hoffmann (2011) et Serge Haroche (2012).

Cette situation n'est pas davantage soutenable au regard du rôle majeur que la recherche française doit continuer à jouer dans tous les champs scientifiques, de plus en plus nombreux, qui requièrent des investissements dans de très grandes infrastructures de recherche telles que les grands observatoires en sciences de l'Univers ou les sources de neutrons ou de lumière synchrotron. Devons-nous par exemple abandonner le leadership du calcul haute performance (et bientôt du stockage et du traitement des données massives, etc.) à la Chine et à d'autres puissances qui dominent l'ores et déjà la liste des 500 machines les plus puissantes du monde ?

Que nous disent les succès engrangés année après année dans les laboratoires ? Que la recherche se joue sur le temps long ; que la persévérance humaine et budgétaire

L'AUTEUR



Alain FUCHS est président du CNRS depuis janvier 2010

est, avec la sélection des meilleurs talents, la condition majeure de la réussite ; que les résultats obtenus sont le fruit d'un travail d'équipe, un travail collectif qui comprend des ingénieurs et des techniciens de grande qualité. Chaque pays, chaque culture s'accommodent avec son génie propre, mais les ingrédients d'une science de qualité sont peu ou prou identiques partout dans le monde.

Les stratégies, en revanche, peuvent être différenciées et elles le sont. En France et singulièrement au CNRS, nous opérons des recherches sur quasiment l'ensemble du front de la connaissance, car les découvertes les plus importantes (celles dites « de rupture ») viennent le plus souvent d'où on ne les attendait pas. Citons par exemple le premier traitement chimiothérapeutique de la syphilis au début du XX^e siècle, issu de travaux de chimistes sur les colorants textiles, lesquels doivent beaucoup à l'invention du gaz d'éclairage au XIX^e siècle ! Cela ne nous empêche pas de définir des priorités scientifiques et de faire des choix, car tous les projets de recherche ne se valent pas.

Si la France figure encore aujourd'hui parmi les nations les plus prospères du monde, c'est aux sciences et aux technologies qu'elle le doit. Sa prospérité repose sur plusieurs siècles de découvertes. Les engagements financiers en matière de recherche sont les promesses qu'une société fait à elle-même et à ses enfants. Ne dilapidons pas notre héritage.



Réagissez au Point de vue sur www.pourlascience.fr

CABINET DE CURIOSITES SOCIOLOGIQUES par Gérald Brunne

J'en étais sûr !

Pour plusieurs commentateurs, les surprises de l'actualité politique récente n'en étaient pas. Mais ce sont des jugements a posteriori, faussés par le biais de rétrospection.

Le monde est devenu déconcertant ces derniers temps, ce ne sont pas les responsables des instituts de sondages qui vous diront le contraire : *Brexit*, élection de Donald Trump aux États-Unis, victoire de François Fillon à la primaire de la droite en France... L'imprédictibilité des phénomènes sociaux n'aura jamais été aussi tangible.

Bizarrement, on trouve de nombreux éditorialistes de réseaux sociaux qui ne paraissent pas si surpris que cela. Tout leur paraît assez logique *a posteriori*, ce qui illustre la malicieuse remarque du célèbre physicien danois Niels Bohr : « La prédiction est un exercice très compliqué, particulièrement lorsqu'elle porte sur le futur. »

En effet, pour prolonger l'idée de Bohr, les prédictions assurées du plus grand succès sont celles qui sont faites après les événements. Il serait un peu cruel de remonter le fil de la publication de ces éditorialistes d'Internet pour voir si leurs éventuels commentaires révélaient réellement leur prémonition des événements.

Cruel, mais sans doute intéressant. C'est justement une expérience de ce genre qu'ont réalisée deux psychologues de l'université hébraïque de Jérusalem, Baruch Fischhoff et Ruth Beyth, bien avant l'existence de Facebook ou Twitter puisque leur article a été publié en 1975.

Quelques années auparavant, le président des États-Unis, Richard Nixon, s'apprêtait à faire une visite historique en Union soviétique et en Chine. Cette rencontre au sommet pouvait susciter bien des spéculations :

Mao Tsé-toung accepterait-il de rencontrer le président des États-Unis ? Ceux-ci reconnaîtraient-ils officiellement la Chine communiste ? Les décennies de guerre froide allaient-elles permettre aux deux blocs de passer des accords ?

Pour toutes ces questions, les deux psychologues ont demandé aux sujets de l'expérience d'assigner une probabilité, par



L'ELECTION DE DONALD TRUMP : un résultat auquel on pouvait s'attendre, selon des commentaires faits après coup.

exemple : « À votre avis, quel pourcentage de chances Nixon a-t-il de rencontrer véritablement le leader de la Chine ? »

Après la rencontre historique effectivement réalisée, les psychologues revinrent vers ceux qui avaient accepté de se prêter au jeu de la prédiction et les interrogèrent sur l'exactitude de leur pronostic.

Les résultats obtenus sont amusants. Les sujets de l'expérience avaient tendance à nettement surestimer la probabilité qu'ils avaient attribuée à un événement qui s'était effectivement produit, tandis qu'ils minoraient

beaucoup celle qu'ils avaient attribuée à un événement possible mais qui, lui, ne s'était pas réalisé. De façon générale, ils exagéraient franchement l'exactitude de leur prévision.

Des expériences de ce type ont été reproduites plusieurs fois à propos d'événements qui ont marqué l'opinion (comme la destitution possible de Bill Clinton, alors président des États-Unis, dans l'affaire Monica Lewinsky).

Ce biais rétrospectif qui nous assure que nous avons une bonne intuition des choses pourrait n'avoir qu'une incidence anecdotique sur nos vies. Cependant, il peut aussi, et c'est plus incommode, nous conduire à mal évaluer une décision politique, par exemple. On reproche facilement à un personnage politique d'avoir pris une décision qui, au moment en question, était justifiée, mais qui a eu de mauvais résultats. Inversement, on le gratifie rarement d'une reconnaissance pour une décision qui a eu des conséquences heureuses, mais dont la pertinence ne sautait pas aux yeux à l'époque où elle a été prise.

Ainsi, ce biais révèle que nous oublions facilement les conditions initiales et l'univers de possibles difficile à prédire qui enserrera généralement les décisions publiques. Notre jugement *a posteriori* peut facilement être injuste, car nous focalisons notre attention sur les conséquences qu'a engendrées une décision plutôt que sur les conditions probabilistes réelles qui l'ont présidée. ■

Gérald BRUNNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.

EXPOSITION

6.12.16 > 27.08.17

PALAIS-DECOUVERTE.FR



80 ans
Palais



M Champs-Élysées Clemenceau M Franklin Roosevelt

#FaitesVosJeux

Exposition conçue avec le concours du

mathematikum
Mathematik zum Anfassen.

en partenariat avec

POUR LA
SCIENCE

JUNIOR

SCIENCE & VIE TV

Syfy

FUTURA

OUI FM

l'éléphant

HOMO SAPIENS INFORMATICS chronique de Gilles Dowek

Les ordinateurs, rois de la mise en abyme

Grâce à sa façon de mémoriser des données, la machine peut, au contraire d'un humain, utiliser des algorithmes récursifs.



Pour trier une liste de nombres par ordre croissant, un algorithme consiste à découper cette liste en deux plus petites et à les trier à leur tour en utilisant ce même algorithme. Une fois les deux petites listes triées, il ne reste plus qu'à les interclasser pour obtenir le résultat. Cet interclassement est une opération rapide, qui ne demande qu'une seule lecture des deux listes.

Cet algorithme assez simple à décrire est, pour les humains que nous sommes, difficile à utiliser. Essayez par exemple de trier la liste [9, 3, 6, 5, 4, 8, 1]. Il faut d'abord la découper en deux listes plus petites, [9, 3, 6, 5] et [4, 8, 1], puis les trier. Pour trier la première, il faut la découper en deux listes plus petites, [9, 3] et [6, 5], puis les trier. Pour trier la première, il faut la découper en deux listes plus petites, [9] et [3], et les trier. Ces listes ne comportant qu'un seul élément, elles sont déjà ordonnées. Il faut alors les interclasser, ce qui donne la liste [3, 9], puis... quelle est l'opération suivante déjà ?

Pour trier la liste [9, 3, 6, 5, 4, 8, 1], l'algorithme demande ainsi de trier la liste [9, 3, 6, 5], ce qui demande, etc. C'est une sorte de mise en abyme qui nous désoriente rapidement, comme ces histoires où des personnages racontent des histoires, où les personnages racontent des histoires, où... nous perdons vite le fil.

Cet algorithme est si difficile à utiliser que, quand nous devons trier une liste, nous préférons utiliser un ordinateur, ou alors utiliser « à la main » un autre algorithme, par exemple chercher le plus petit élément dans la liste, puis le deuxième, etc., théo-

riquement moins efficace, mais bien plus facile pour nous.

Le fait que l'algorithme de tri décrit plus haut soit difficile à utiliser pour les humains, mais facile pour les ordinateurs, révèle une différence essentielle entre le fonctionnement de notre cerveau et celui d'un ordinateur. Nous avons une capacité limitée à traiter les mises en abyme, car nous avons



L'ORDINATEUR GERE AVEC FACILITE les processus imbriqués les uns dans les autres comme des poupées russes

une capacité limitée à mémoriser, sans les confondre, une histoire interrompue par le récit d'une autre histoire, interrompue par le récit d'une autre histoire, etc.

En revanche, une telle mémorisation ne pose aucune difficulté à un ordinateur, dont la mémoire comporte une « pile », qui sert précisément à ne pas perdre le fil dans un tel emboîtement. Ainsi, pour trier la liste [9, 3, 6, 5, 4, 8, 1], l'ordinateur la découpe en deux listes plus petites, [9, 3, 6, 5] et [4, 8, 1], met la seconde, [4, 8, 1], au sommet de la pile, puis découpe la première, [9, 3, 6, 5]

en deux listes plus petites, [9, 3], et [6, 5], met la seconde, [6, 5], au sommet de la pile, etc. Quand, après avoir trié et interclassé les listes [9] et [3], il lui faudra trier la liste [6, 5], il la retrouvera au sommet de la pile. Et ainsi de suite.

Notre difficulté à ne pas nous perdre lors d'une telle mise en abyme a donc une explication simple : à la différence d'un ordinateur, notre cerveau n'a pas de pile. Cette « infirmité » explique par exemple que nous n'aimions pas être interrompus. Ainsi, quand nous sommes en train de lire et qu'un appel téléphonique nous interrompt, il nous est difficile de mettre notre lecture au sommet de la pile, de répondre à l'appel, et de l'y récupérer ensuite au point où nous l'avions laissée. Si jamais, alors que nous sommes en train de répondre au téléphone, nous sommes interrompus à nouveau, c'est la catastrophe. L'absence de pile dans notre mémoire explique aussi comment les conteurs se jouent facilement de nous avec de telles mises en abyme et pourquoi, quand nous voulons nous exprimer clairement, nous avons tout intérêt à éviter les digressions et les propositions relatives emboîtées.

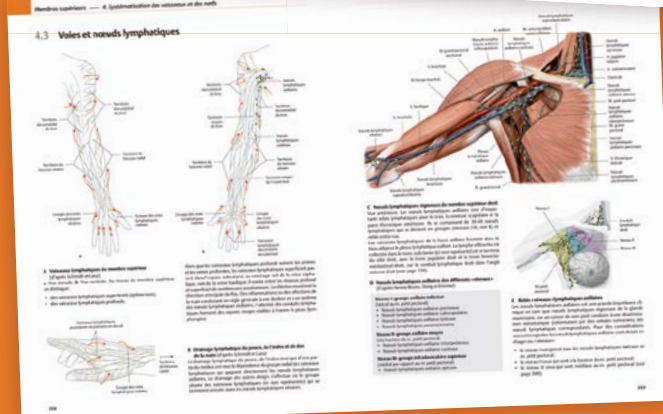
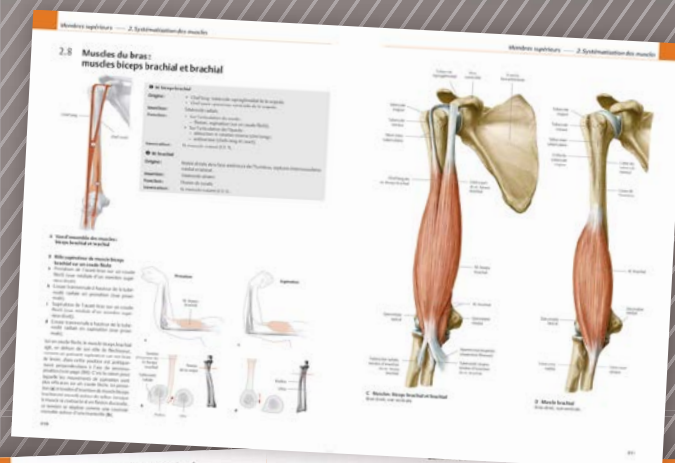
Ce handicap explique aussi que, à l'époque où nous n'avions pas d'ordinateurs, nous concevions parfois des algorithmes inutilement complexes, mais qui nous semblaient faciles à utiliser « à la main », car ils évitaient de telles mises en abyme.

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

Tout le corps humain en 3 volumes

**ATLAS
D'ANATOMIE
PROMÉTHÉE**

DECouvrez également :



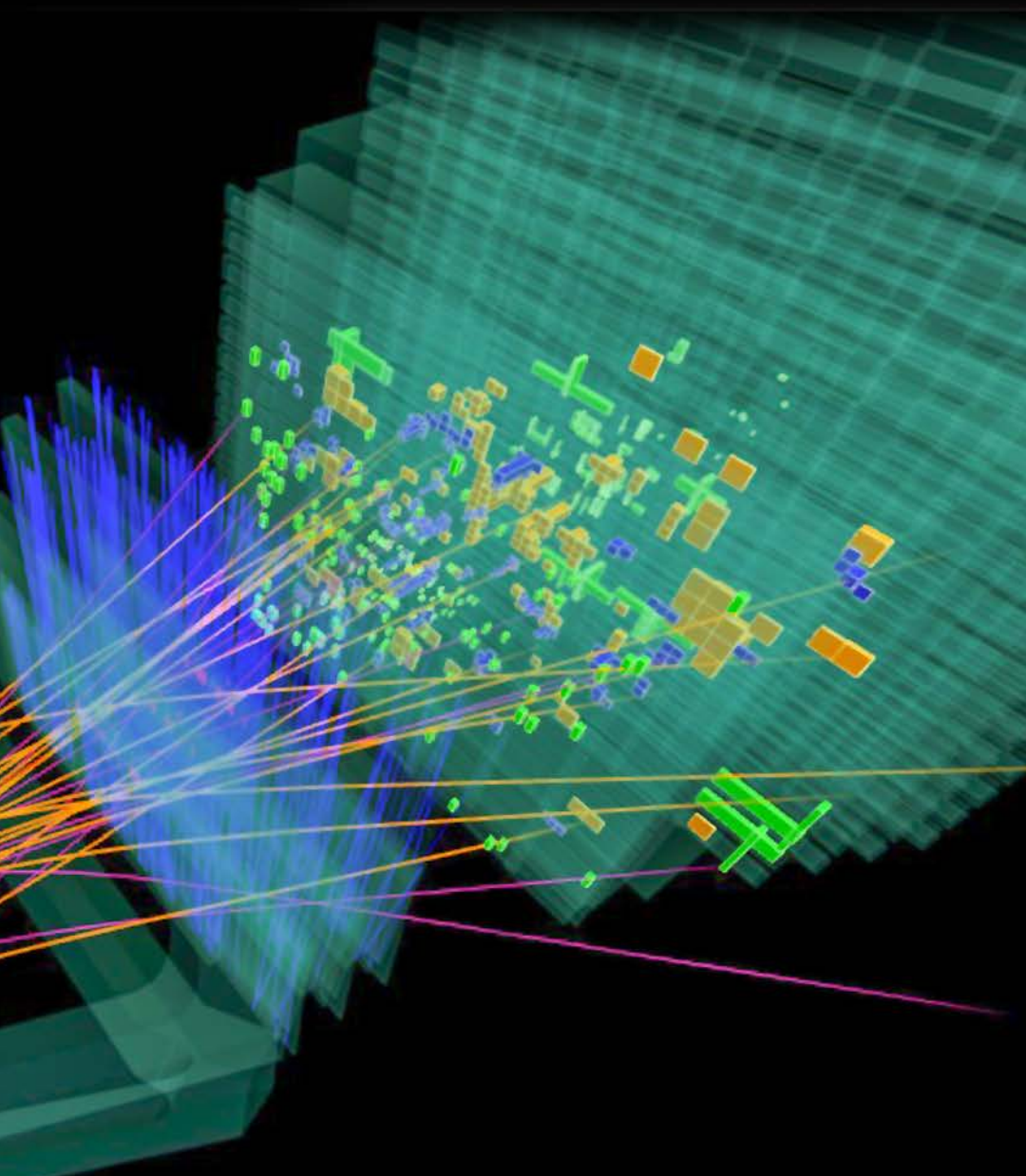
- Plus de **170 tableaux** par titre
- Près de **1800 illustrations** dans chaque tome
- Des **centaines d'exemples cliniques illustrés**
- Chaque sujet est exposé sur une **double page**.
- Pour une **approche complète et rapide**, en un seul coup d'œil
- Des **images par ordinateur** hautes en couleur, d'une précision exceptionnelle. **hyper-réalistes**

Des quarks aux pentaquarks

Georg Wolschir

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 !

FEU D'ARTIFICES DE PARTICULES. Les collisions de protons de haute énergie dans l'expérience *LHCb*, au Cern, produisent de nombreuses particules (dont les trajectoires sont représentées en rose et en orange). En analysant ce type d'événement, les physiciens ont découvert des particules exotiques composées de quatre ou cinq quarks



L'ESSENTIEL

Dans les années 1960.

Les physiciens ont découvert que le proton et le neutron sont formés de composants élémentaires, les quarks.

Ceux-ci ne peuvent être observés à l'état isolé. Ils existent sous des formes liées de trois quarks, ou d'un quark et d'un antiquark.

D'autres configurations.

Comprenant quatre ou cinq quarks, sont théoriquement possibles.

Les physiciens

commencent à les observer et les étudier dans les accélérateurs de particules.

Saviez-vous qu'au LHC, le Grand collisionneur de hadrons du Cern, près de Genève, de nouvelles particules ont été mises en évidence en juillet 2015 et en juin 2016 ? Probablement pas. Ces découvertes ont fait beaucoup moins de bruit que celle du boson de Higgs en 2012 et pourtant, elles sont presque aussi importantes. La structure de ces particules est exotique et confirme les hypothèses faites dans les années 1960 concernant leur existence. Les mesures précises de leurs propriétés, effectuées dans le cadre de l'expérience

LHCb, ouvrent une nouvelle fenêtre sur le comportement de la matière aux échelles les plus infimes.

De quoi s'agit-il ? A l'échelle la plus fondamentale, la matière, à l'exception de l'électron et des particules apparentées, est composée de quarks. Ces constituants élémentaires s'associent par trois pour former le proton, le neutron – les composants du noyau atomique – et bien d'autres particules (les « baryons »). Il existe aussi des particules constituées d'un quark et d'un antiquark (les « mésons »). Mais en

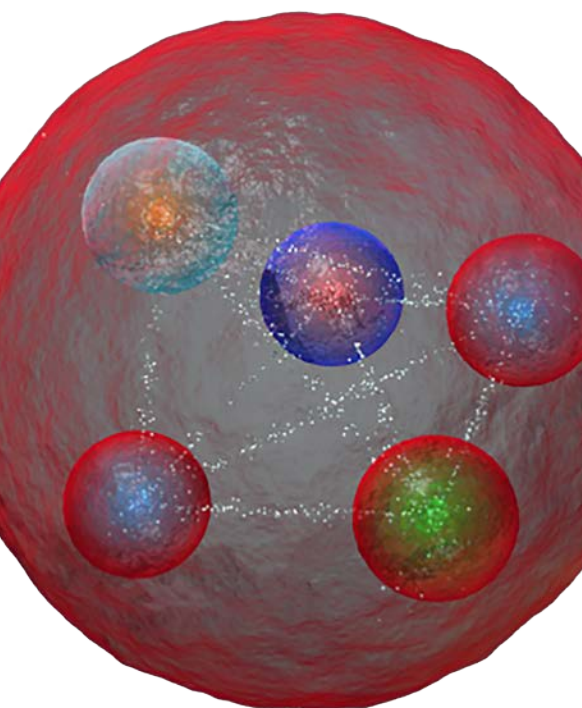
existe-t-il d'autres ? Formées de quatre, cinq quarks, ou plus ? Depuis une dizaine d'années, des indices s'accumulaient en faveur de ces structures multiquarks. Les récentes découvertes au LHC le confirment : des tétraquarks et des pentaquarks peuvent se former dans la nature.

Pour comprendre les enjeux de ces découvertes, il faut remonter au début des années 1960. Les physiciens étaient confrontés à un problème. Plusieurs années auparavant, grâce à des expériences de collisions, ils avaient découvert une multitude

L'AUTEUR



Georg WOLSCHIN est professeur à l'Institut de physique théorique de l'université de Heidelberg, en Allemagne.



TROIS QUARKS PEUVENT SE LIER et former ainsi un baryon, type de particules dont les plus légères sont le proton et le neutron. Par ailleurs, un quark peut se lier à un antiquark et former ainsi un méson, type de particule instable qui comprend notamment les pions et les kaons. On ne connaissait pas d'autres états liés de quarks. En 2015, le premier pentaquark, formé de quatre quarks et d'un antiquark, a été mis en évidence au LHC (Large Hadron Collider, ou Grand collisionneur de hadrons).

de particules. Ce zoo était au début très confus, mais les théoriciens sont parvenus à l'ordonner à l'aide de la théorie mathématique des groupes de symétrie. Ces travaux suggéraient que la plupart des particules alors connues n'étaient pas des particules élémentaires, mais qu'elles étaient formées d'un petit nombre de constituants élémentaires. Lesquels ?

En 1964, deux théoriciens américains ont conçu, indépendamment l'un de l'autre, le modèle des quarks, selon lequel le proton et le neutron, par exemple, sont formés de trois particules ponctuelles. L'un d'eux, Murray Gell-Mann, à l'institut de technologie de Californie (Caltech), a nommé « quarks » ces particules élémentaires, en s'inspirant d'un extrait du roman *Finnegans Wake* de l'auteur irlandais James Joyce. De son côté, George Zweig, qui travaillait au Cern, a utilisé le terme d'« as » (*aces* en anglais), mais c'est l'expression proposée par Murray Gell-Mann qui a fini par s'imposer.

Le modèle suppose différentes sortes, ou « saveurs », de quarks, dont les premières sont le quark *up* (ou *u*), le quark *down* (ou *d*) et le quark *strange* (ou *s*). Plus tard, essentiellement pour expliquer les propriétés de particules nouvellement découvertes, se sont ajoutées trois variantes plus lourdes : les quarks *charm* (ou *c*), *bottom* (ou *b*) et *top* (ou *t*).

Les quarks sont caractérisés par des « nombres quantiques » tels qu'un spin (moment cinétique intrinsèque) égal à $1/2$ dans les unités usuelles, une charge électrique fractionnaire ($+2/3$ ou $-1/3$ de la charge de l'électron), ainsi qu'une « couleur » pouvant prendre trois valeurs nommées « rouge », « vert », et « bleu » (propriétés qui n'ont cependant rien à voir avec la notion habituelle de couleur, liée à la longueur d'onde de la lumière). Il existe aussi des antiquarks, de même masse que leur quark associé, mais ayant une charge électrique opposée et une « anticouleur ».

Les quarks s'attirent entre eux par une force fondamentale, l'interaction forte. Celle-ci est réalisée par un échange de particules électriquement neutres, mais porteuses d'une charge de couleur, nommées gluons. Ces derniers sont de masse nulle, comme les photons médiateurs de l'interaction électromagnétique. Les spécificités de l'interaction forte sont décrites

par une théorie quantique des champs, la chromodynamique quantique.

Cette théorie, proposée en 1973 par les Américains David Politzer, Frank Wilczek et David Gross, stipule que les quarks ne peuvent exister isolément, sauf dans des conditions extrêmes de température et de pression qui régnaient au tout début de l'Univers – environ dix microsecondes après le Big Bang. La matière était alors sous la forme d'une mer de quarks et de gluons libres, un « plasma quarks-gluons ». Des collisions d'ions de haute énergie dans les accélérateurs de particules permettent aujourd'hui de reproduire ces conditions particulières pendant une fraction de seconde. Mais en dehors de ces situations, les quarks s'associent spontanément pour former des structures – des « hadrons » – de telle façon que la « somme » des couleurs de leurs quarks produise une charge globale de couleur neutre (voir l'illustration page 24, en bas).

Cette règle de couleur neutre implique que l'on peut avoir des baryons, composés de trois quarks (portant chacun une des trois couleurs possibles), tels que les neutrons (*udd*) et les protons (*uud*), et des mésons, constitués d'un quark et d'un antiquark de saveurs différentes (portant une couleur et l'anticouleur associée, rouge et antirouge par exemple), tels que les pions, kaons, etc.

Sous le proton, a mer de quarks

Cette description des hadrons est cependant incomplète. Aux quarks ci-dessus, il faut ajouter une « mer de quarks ». D'après la physique quantique, le vide est le siège d'un phénomène étonnant : la naissance à des instants aléatoires de paires particule-antiparticule qui s'annihilent et disparaissent aussitôt. Au cœur des hadrons, il en va de même : des paires quark-antiquark se créent et disparaissent presque immédiatement. Cette mer de quarks ne détermine pas les nombres quantiques (spin, charge) des hadrons, mais influe sur leur masse et certaines autres propriétés.

Dans les années 1960, le concept de quark n'allait pas du tout de soi. L'influent Murray Gell-Mann avait certes réussi à faire une place à son modèle, mais celui-ci n'était pas encore fermement admis par les physiciens. D'ailleurs, il obtint le prix Nobel de physique en 1969 pour ses contributions et découvertes concernant

la classification des particules élémentaires et leurs interactions», mais pas spécifiquement pour l'idée des quarks. Cela explique probablement pourquoi le comité Nobel n'a pas également honoré George Zweig cette année-là.

En réalité, Murray Gell-Mann, au début, ne croyait pas à l'existence physique des quarks. Il les voyait plutôt comme des artifices de calcul. À l'inverse, George Zweig était convaincu dès le début que les quarks avaient une réalité physique, et il proposa de les rechercher expérimentalement. Mais le fait que les quarks ne peuvent exister de façon isolée hors des hadrons était un obstacle à leur détection.

Dans la seconde moitié des années 1960, les théoriciens James Bjorken et Richard Feynman ont esquissé un moyen de mettre en évidence les quarks : en bombardant des protons avec des électrons très énergétiques, les physiciens pouvaient sonder la structure interne des premiers.

Cette idée a été mise en œuvre au SLAC, le centre de l'accélérateur linéaire de Stanford, aux États-Unis. Les chercheurs ont étudié la diffusion d'électrons ayant une énergie de plus de 7 gigaélectronvolts (GeV) et dirigés contre une cible constituée d'hydrogène liquide. De façon analogue aux célèbres expériences de diffusion de noyaux d'hélium (issus de la radioactivité α) par une feuille d'or menées au début du XX^e siècle par Ernest Rutherford, qui avaient permis de comprendre que l'atome est formé d'un tout petit noyau autour duquel des électrons sont en orbite relativement lointaine, les expériences de 1969 ont mis en évidence que le proton contient des constituants chargés et au moins 100 000 fois plus petits que le proton, que l'on a dénommés « partons ».

Des propriétés essentielles de ces partons concordaient avec celles des quarks. Ces derniers étaient donc bien réels. On constata aussi une propriété contre-intuitive : l'interaction forte est d'autant plus faible que l'on s'introduit davantage en profondeur dans le proton. Plus précisément, si l'on rapproche beaucoup deux quarks l'un de l'autre, la force (non électromagnétique) qui les lie devient nulle. C'est la « liberté asymptotique », une propriété fondamentale dont rend compte la chromodynamique quantique.

Des indices expérimentaux de l'existence des gluons ont été obtenus ensuite au synchrotron allemand DESY, près de

Un quatuor de tétraquarks découvert à LHCb

■ En juin 2016, les membres de la collaboration LHCb ont annoncé avoir détecté quatre tétraquarks, bien que la recherche de telles particules

expérimental LHCb.

L'expérience LHCb a été conçue à la fin des années 1990 pour étudier la différence de comportement entre particules et antiparticules. Les premières données ont été collectées en 2010. Installée auprès du LHC, l'anneau de collisions proton-proton au Cern, cette expérience compare surtout l'évolution au cours du temps des mésons contenant un quark b ou un quark c et celle de leurs antimésons. Il s'agit de mesurer des différences de propriétés entre la matière et l'antimatière, et en particulier d'étudier ce que les physiciens nomment la violation de la symétrie CP. L'asymétrie entre la matière et l'antimatière expliquerait en particulier pourquoi l'Univers contient de la matière et pas d'antimatière.

L'expérience LHCb permet aussi d'étudier avec précision les interactions des quarks et expliquera peut-être pourquoi les amplitudes de ces interactions varient, selon les saveurs des quarks en jeu, d'environ trois ordres de grandeur.

Le dispositif offre aussi la possibilité de mettre en évidence de nouvelles particules qui ne sont pas prédites par le modèle standard de la physique des particules.

Les collisions proton-proton engendrent un très grand nombre de particules instables telles que le méson K^+ ou le méson B^+

comme ce dernier contient un quark b , il est nommé (méson beau), mais aussi des baryons beaux. L'expérience LHCb permet d'isoler les mésons et les baryons beaux, d'identifier leurs produits de désintégration et de mesurer avec précision leurs propriétés cinématiques. Grâce à ce dispositif complexe, constitué de nombreux détecteurs, il est possible de rechercher dans la désintégration de mésons beaux des états exotiques tels que les tétraquarks et les pentaquarks, et de sonder du même coup le modèle des quarks.

En juin 2016, la collaboration LHCb a confirmé l'existence du tétraquark noté $X(4140)$. La découverte de cette particule avait été annoncée en 2009 par la collaboration CDF, à l'accélérateur Tevatron du Fermilab, aux États-Unis, puis confirmée par une seconde analyse de CDF et par les collaborations CMS, au LHC, et D0, au Tevatron. Mais le spin et la parité de cet état exotique étaient restés inconnus.

La collaboration LHCb ajoute à ce tétraquark trois autres, notés $X(4274)$, $X(4500)$ et $X(4700)$. Les quatre tétraquarks ont été détectés dans les désintégrations d'un méson B^+ dont les produits finaux sont les trois mésons J/ψ , ϕ et K^+ . Le tétraquark formé dans ce processus se désintègre rapidement pour donner les mésons J/ψ et ϕ

observés. Les nouvelles particules ont toutes la même composition en quarks ($c\bar{c}s\bar{s}$), mais sont de masses différentes.

Pour mener ces recherches, les physiciens ont analysé l'ensemble des données collectées entre 2010 et 2012. Ils ont notamment reconstruit les distributions de masse des sous-systèmes J/ψ et ϕ , d'une part, et de K^+ et ϕ , d'autre part (nombre d'événements observés en fonction de la masse du sous-système). Ces distributions sont ensuite interprétées en fonction de toutes les résonances de particules de courte durée de vie produites lors d'une désintégration) connues. En comparant les données aux calculs, les physiciens de LHCb ont conclu que de nouvelles particules étaient bien produites dans la désintégration du méson B^+ et ils ont pu déterminer leur spin et leur parité.

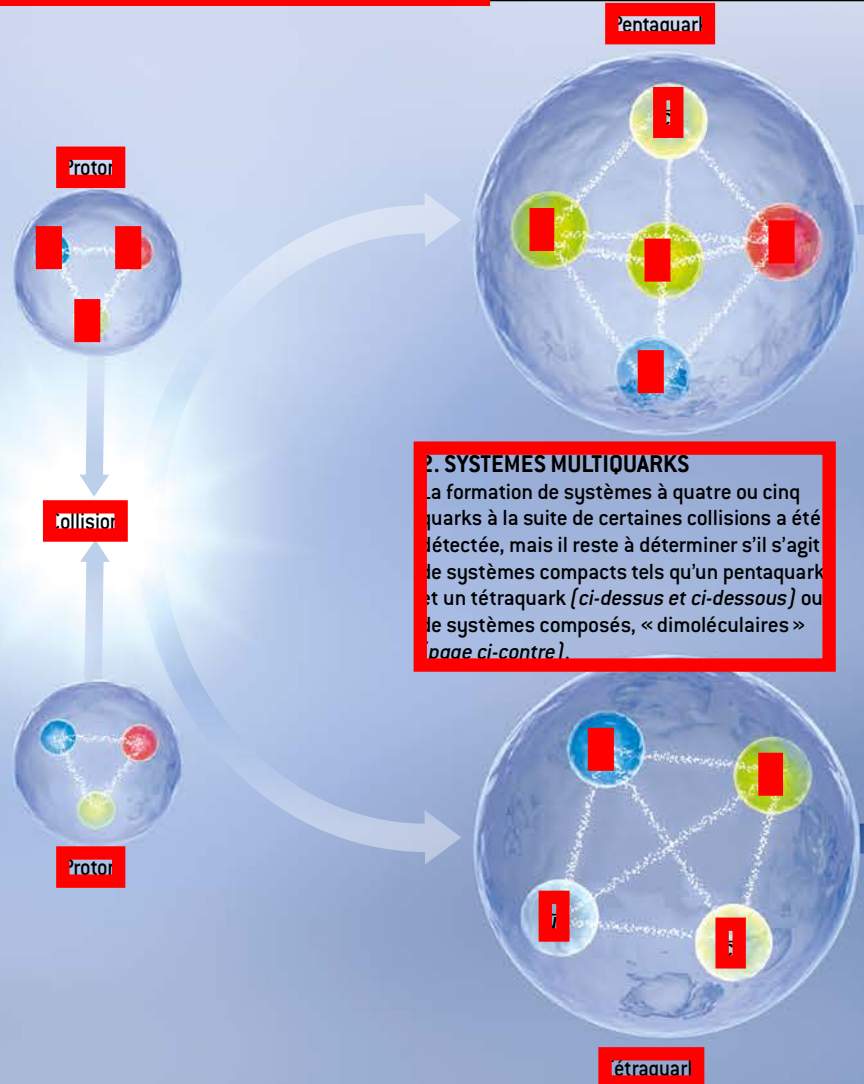
Ces quatre particules sont intéressantes, car il s'agit des seules structures connues de quatre quarks ne contenant ni quark u ni quark d , les quarks les plus légers dont est formée la matière ordinaire. La nature de ces particules pose encore question : s'agit-il de véritables tétraquarks, c'est-à-dire d'états liés de quatre quarks ($c\bar{c}s\bar{s}$), ou de « molécules » $D_s D_s^*$, associant deux mésons $c\bar{s}$ et $\bar{c}s$? Il faudra attendre les données de la seconde phase d'exploitation du LHC, de 2015 à 2018, pour mieux comprendre leur structure.

— Renaud Le Gac
Centre de physique des particules de Marseille (CPPM)

COMMENT LES TETRAQUARKS ET LES PENTAQUARKS SONT PRODUITS

1. COLLISION

Au collisionneur LHC du Cern, près de Genève, les physiciens accélèrent des protons dans un anneau de 27 kilomètres de circonférence. La moitié des protons parcourent ce trajet à une vitesse proche de celle de la lumière dans un sens, et l'autre moitié dans le sens contraire. En quatre sites sur l'anneau, correspondant aux quatre grandes expériences, dont *LHCb*, les faisceaux de protons se croisent et créent des collisions proton-proton. L'énergie des collisions était de 7-8 téraélectronvolts (TeV) dans une première phase du LHC; elle est maintenant de 13 TeV. Ces collisions énergétiques produisent de nouvelles particules, parmi lesquelles peuvent émerger d'éphémères tétraquarks ou pentaquarks.



2. SYSTEMES MULTIQUARKS

La formation de systèmes à quatre ou cinq quarks à la suite de certaines collisions a été détectée, mais il reste à déterminer s'il s'agit de systèmes compacts tels qu'un pentaquark et un tétraquark (*ci-dessus et ci-dessous*) ou de systèmes composés, « dimoléculaires » (*page ci-contre*).

LES PRINCIPALES PROPRIETES DES QUARKS

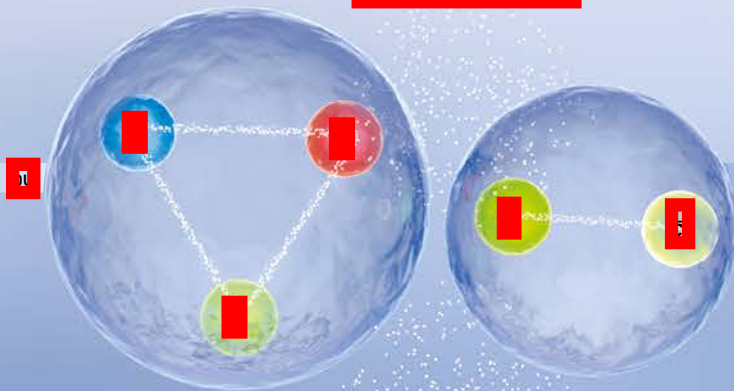
Il existe six types ou « saveurs » de quarks, répartis en trois « générations ». Étant de spin 1/2, ce sont des fermions : deux quarks identiques ne peuvent pas être dans le même état quantique. Ces six particules élémentaires ont des masses différentes. Leur charge électrique est une fraction (1/3 ou 2/3) de la charge élémentaire e . Les quarks portent en outre une charge de « couleur », liée à l'interaction forte (tout comme la charge électrique est liée à l'interaction électromagnétique). Les médiateurs de cette force sont les gluons. La charge de couleur peut être le « rouge », le « bleu » et le « vert ». L'addition des trois couleurs ou l'addition d'une couleur et de son anticouleur donnent un résultat neutre, qui est le seul observable. Par ailleurs, pour chaque quark, il existe un antiquark, de mêmes propriétés mais avec des signes opposés.

Génération	Quark / Antiquark	Charge(e)	Masse(MeV)
1	up / anti-up	$+2/3$ / $-2/3$	2,3
1	down / anti-down	$-1/3$ / $+1/3$	4,8
2	strange / anti-strange	$-1/3$ / $+1/3$	95
2	charm / anti-charm	$+2/3$ / $-2/3$	1 275
3	bottom / anti-bottom	$-1/3$ / $+1/3$	4 180
3	top / anti-top	$+2/3$ / $-2/3$	173 210

Selon les règles de la chromodynamique quantique, une particule portant une couleur, tel le quark, ne peut être isolée. Celui-ci se combine à d'autres pour former des assemblages neutres de couleur, dont les plus simples sont :



Pentaquark dimoléculaire

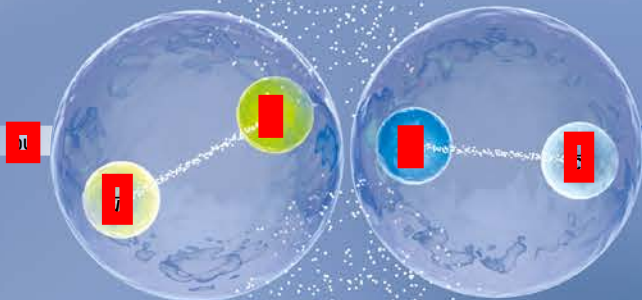


Charmonium J/ψ

Proton



La cohésion des pentaquarks et tétraquarks dimoléculaires est assurée par une force résiduelle de l'interaction forte



Tétraquark dimoléculaire

3. PRODUITS DE DESINTEGRATION

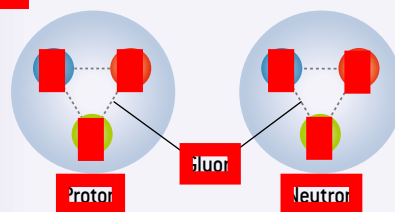
Les pentaquarks et les tétraquarks ont une durée de vie inférieure à 10^{-21} seconde. Ils ne peuvent être directement détectés. On peut déduire qu'ils se sont formés en analysant les particules (baryons et mésons) produites lors de leur désintégration. Diverses désintégrations sont possibles. Les possibilités les plus fréquentes et les mieux étudiées sont représentées ici.



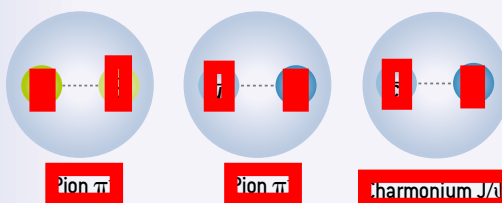
HADRONS

Les particules sensibles à l'interaction forte sont nommées hadrons et sont composées de quarks. Les baryons sont constitués de trois quarks. Les plus connus et les plus légers sont les constituants des noyaux atomiques : le proton (stable) et le neutron (dans un noyau atomique, il est stable, mais à l'état libre sa durée de vie est d'environ 880 secondes). Les autres baryons ont une durée de vie bien plus courte (10^{-8} seconde au plus). Il en est de même pour les mésons, des particules formées d'un quark et d'un antiquark. Tant les baryons que les mésons peuvent provenir de toutes les combinaisons de quarks possibles. Ils doivent juste suivre les règles du jeu de la chromodynamique quantique et être de couleur totale neutre. Les quarks n'existent pas à l'état libre dans la nature car leur attraction mutuelle, due à l'interaction forte, augmente avec la distance qui les sépare.

BARYON



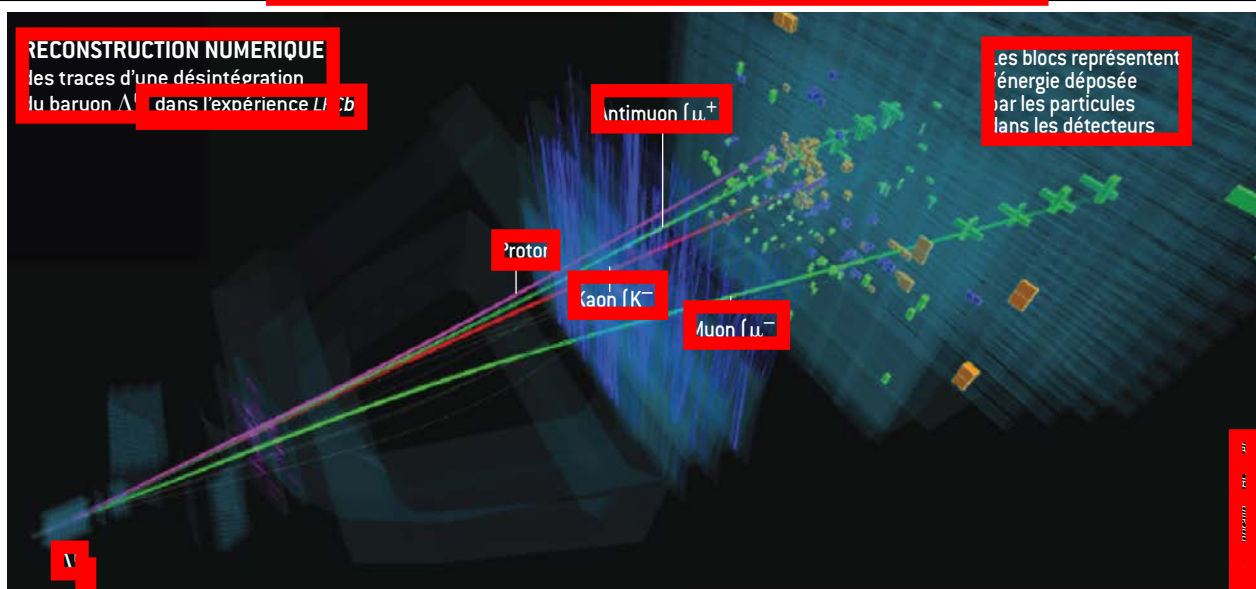
MESON



COMMENT UN PENTAQUARK A ETE OBSERVE AU LHC

RECONSTRUCTION NUMERIQUE

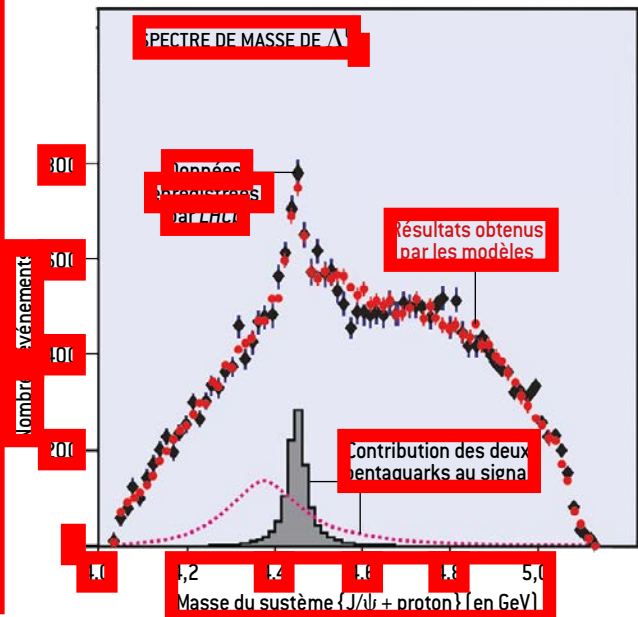
les traces d'une désintégration du baryon Λ^0 dans l'expérience *LHCb*



les blocs représentent l'énergie déposée par les particules dans les détecteurs

Les collisions proton-proton au LHC ont permis d'observer pour la première fois dans l'expérience *LHCb* la désintégration d'un baryon Λ^0 [composé de quarks u , d et b] en trois particules : un kaon K^- , un méson J/ψ [qui se désintègre très vite en deux muons de charges opposées] et un proton. Dans l'expérience *LHCb*, un champ magnétique dévie les particules en fonction de leur masse, leur énergie cinétique et leur charge électrique (en haut). Divers détecteurs enregistrent ces données pour permettre l'identification des particules. Le processus principal de désintégration du baryon Λ^0 suppose d'abord une désintégration en un méson J/ψ et un baryon instable Λ^* , qui se désintègre à son tour en un proton et un kaon. Une autre voie possible de désintégration est d'abord la formation d'un kaon et d'un pentaquark, qui se désintègre en un proton et un méson J/ψ . Pour vérifier que ce pentaquark se forme parfois, les physiciens étudient le nombre de désintégrations de Λ^0 en fonction de la masse du système J/ψ -proton détecté (à droite). En unités d'énergie, le pic, ou résonance, survient vers 4,45 gigaélectronvolts (GeV). Il est compatible avec la formation de l'un ou l'autre de deux états pentaquarks $uuc\bar{c}ud$, de charge $+1$ lors de la désintégration du baryon Λ^0 .

SPECTRE DE MASSE DE Λ^0



Hambourg, dans l'expérience *PETRA*. Lors de collisions électron-positron à haute énergie, les chercheurs produisaient des paires quark-antiquark, chaque particule s'échappant dans une direction différente. Or, comme un quark ne peut être ainsi isolé, l'énergie de la collision produisait un grand nombre d'autres quarks et d'antiquarks qui se combinaient avec les premiers pour former des hadrons. Dans les détecteurs, les chercheurs observaient donc deux jets de hadrons, chacun correspondant au quark ou à l'antiquark initial. Mais parfois, un troisième jet survenait – signe qu'une particule supplémentaire participait à la

réaction. Des analyses plus précises ont montré qu'il s'agissait d'un gluon.

Ainsi, les quarks se révélaient bien réels et s'associaient en duos ou en trios pour former respectivement les mésons et les baryons. Mais d'autres associations étaient-elles possibles ? Aussi bien George Zweig que Murray Gell-Mann avaient déjà prédit en 1964 la possibilité de systèmes constitués de quatre quarks (deux couples quark-antiquark) ou de cinq quarks (trois quarks et un couple quark-antiquark). En d'autres termes : des tétraquarks et des pentaquarks. Du point de vue théorique, ces systèmes multiquarks sont tout à fait

compatibles avec le modèle standard de la physique des particules.

Les calculs théoriques indiquent que ces états ont une durée de vie très courte, inférieure à 10^{-21} seconde. Ils sont donc impossibles à détecter directement dans des expériences. Ils se désintègrent en d'autres particules moins éphémères, que les détecteurs sont en mesure d'enregistrer. À partir de l'angle de diffusion de ces particules, de leur énergie, etc., il est possible de déterminer si un tel système multiquarks s'est formé et, si oui, d'en déduire certaines propriétés telles que sa masse, son spin et sa parité (c'est-à-dire

son comportement vis-à-vis d'une inversion des axes du repère de coordonnées spatiales).

La recherche de tels systèmes multiquarks s'est alors développée. Elle est devenue, en l'espace de quelques années, un domaine d'étude à part entière de la physique expérimentale des particules, porte de nombreux succès. En 2003, les physiciens de l'expérience *Belle*, au centre japonais de recherches KEK à Tsukuba, ont découvert une nouvelle résonance dans des collisions électron-positron. En physique des particules, on entend par « résonance » un système instable, un état intermédiaire d'une très courte durée de vie qui apparaît dans un processus de désintégration. La résonance découverte dans l'expérience *Belle* se désintègre en un méson J/ψ (composé d'un quark c et d'un antiquark $\bar{c}$, on l'appelle aussi charmonium) et en deux pions. Cette résonance ressemble à celle que l'on observe pour le méson J/ψ lui-même, mais la durée de vie de cette nouvelle résonance est bien plus longue que celle du méson J/ψ .

La fructueuse chasse aux tétraquarks

La nouvelle résonance a été examinée avec précision dans d'autres expériences, à Stanford, au Fermilab ou au LHC, de sorte qu'il n'y a maintenant aucun doute quant à son existence. Une analyse précise par la collaboration *LHCb* a permis de déterminer son spin et sa parité. La particule a été nommée $X(3872)$, où le nombre correspond à la masse de la particule en mégaelectronvolts, soit 3,872 GeV. Elle est donc près de quatre fois plus lourde qu'un proton.

Au vu de son possible contenu en quarks de valence ($c\bar{c}u\bar{u}$), il pourrait s'agir d'un véritable tétraquark ; sa structure n'est toutefois pas encore complètement élucidée. En effet, cette résonance pourrait ne pas être une particule unique, mais une association formée d'un méson D^0 ($c\bar{u}$) et d'un antiméson $\bar{D}^0$ ($\bar{c}u$). Le contenu en quarks de valence est le même, mais la structure est différente. Les deux mésons seraient liés par une force résiduelle de l'interaction forte agissant entre les quarks, une force résiduelle analogue à celle qui maintient les protons et les neutrons au sein du noyau atomique ou les atomes au sein d'une molécule ; on parle pour cette raison d'état dimoléculaire.

L'hypothèse d'un méson habituel, fait d'un quark et d'un antiquark, n'est pas non plus complètement exclue, mais semble moins probable au vu de résultats de la collaboration *LHCb* publiés en 2013. Les données les plus récentes du LHC, obtenues avec des collisions proton-proton à une énergie de 13 téraélectronvolts (1 téraélectronvolt, ou TeV, correspond à 1 000 GeV, soit 10^{12} électronvolts), sont en cours d'analyse et permettront peut-être d'en savoir plus sur cette résonance.

En 2007, la collaboration *Belle* a détecté un autre candidat au titre de tétraquark, le $Z^+(4430)$, dont le contenu en quarks de valence serait $c\bar{c}u\bar{d}$. Sa détection a été confirmée en 2014 par la collaboration *LHCb*.

La liste de potentiels tétraquarks continue de s'allonger avec le $Z_c(3900)$ – observé en 2013 par la collaboration *Belle* et au BEPC (le collisionneur électron-positron de Beijing, en Chine) – et quatre candidats annoncés en juin 2016 par la collaboration *LHCb* (voir l'encadré page 23).

Mais qu'en est-il des pentaquarks ? Leur recherche a été plus longue et houleuse. Par exemple, en 2002, dans l'expérience SPring-8 au Japon, la résonance notée Θ^+ a été interprétée comme étant un pentaquark. D'après les données, cette résonance correspondait à une particule environ 1,6 fois plus massive que le proton et de très courte durée de vie, de l'ordre de 10^{-23} seconde. On supposait que son contenu en quarks était $uudd\bar{s}$. La valeur de sa masse était très encourageante, car elle était très proche de celle d'un pentaquark prévu par des théoriciens en 1997. Plusieurs autres groupes d'expérimentateurs à travers le monde ont cru aussi avoir obtenu des indices de l'existence de ce pentaquark. Cependant, en reprenant les analyses statistiques de ces expériences, certains physiciens ont émis des doutes. D'autres expériences ont

alors été conçues pour traquer le pentaquark, sans succès, et il est aujourd'hui très peu probable que Θ^+ soit bien un pentaquark.

La recherche de pentaquarks composés de quarks légers u , d et s semble n'avoir donné que des résultats négatifs. En 2015, la collaboration *LHCb* a publié un article annonçant la détection de pentaquarks contenant des quarks c (voir l'encadré page 26). Les chercheurs de cette expérience étudiaient les désintégrations d'un type

Glossaire

INTERACTION FORTE

L'une des quatre interactions fondamentales, les autres étant la gravitation, la force électromagnétique et l'interaction faible. Les interactions faible et forte n'agissent qu'à des distances subatomiques.

QUARK

Constituant élémentaire de la matière, sensible à l'interaction forte.

GLUON

Particule élémentaire qui véhicule l'interaction forte et qui lie les quarks entre eux.

HADRON

Particule constituée de quarks.

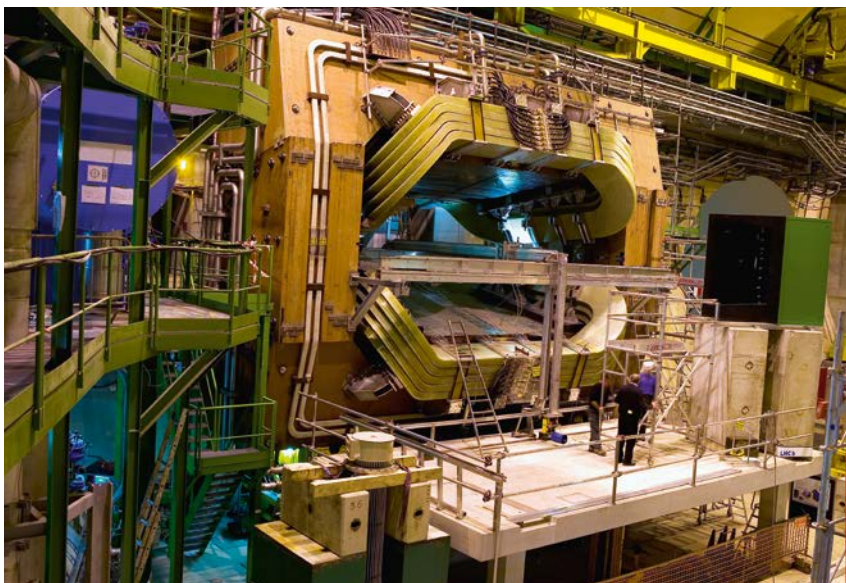
MÉSON

Hadron constitué d'un quark et d'un antiquark liés.

BARYON

Hadron constitué de trois quarks liés. Le proton et le neutron sont les baryons les plus légers.

La recherche des pentaquarks et des tétraquarks est devenue un sujet d'étude à part entière en physique expérimentale



AU CERN, LORS DE L'ASSEMBLAGE

de l'expérience *LHCb*. Ce dispositif et l'équipe qui le gère sont spécialisés dans l'étude de particules contenant un quark *b*. C'est lors de la désintégration de ces particules instables que des systèmes à quatre ou cinq quarks ont été produits.

particulier de baryon (noté Λ_b^0) engendré lors de collisions proton-proton. L'objectif visé était initialement de déterminer avec plus de précision la durée de vie de ces particules à désintégration rapide. Avec une masse d'environ 5,6 GeV, ces baryons électriquement neutres sont 6 fois plus lourds que les neutrons. Comme ces derniers, ils ont trois quarks de valence : udb , comme si l'un des deux quarks *d* légers du neutron (udd) avait été remplacé par un quark *b*, plus lourd.

Dans cette expérience, les physiciens n'ont pas seulement déterminé plus précisément la durée de vie moyenne, égale à 1,48 picoseconde ($1,48 \times 10^{-12}$ seconde) ; ils ont aussi découvert la désintégration de ce baryon en un kaon négativement chargé (un méson $\bar{u}s$), un méson J/ψ ($c\bar{c}$) et un proton (uud). Cette désintégration, pour passer d'un total de trois quarks à sept avec des saveurs différentes, requiert plusieurs processus parfaitement décrits par le modèle standard. Qui plus est, l'analyse des particules produites a mis en évidence des structures caractéristiques de résonance à des énergies de 4,38 et 4,45 GeV, ce qui correspond à environ 4,7 fois la masse du proton. Ces résonances sont des états intermédiaires formés lors de la désintégration du Λ_b^0 , chacun se décomposant à son tour pour former le J/ψ et le proton ; ces états ont ainsi pour quarks de valence $u\bar{c}cud$ (voir l'encadré page 26).

Comme pour certains des tétraquarks, une incertitude persiste : il n'est pas évident que ces résonances correspondent à de véritables pentaquarks, c'est-à-dire d'objets

compacts à peu près sphériques, faits de cinq quarks étroitement liés par les gluons. En effet, il pourrait aussi s'agir d'un méson J/ψ et d'un baryon liés par une force résiduelle de l'interaction forte. Comme pour les combinaisons de deux mésons dans les tétraquarks, on parle de structure dimoléculaire. Certaines analyses permettent déjà d'écarter certaines hypothèses de structures dimoléculaires, mais pas encore pour tous les systèmes multiquarks observés. De nouvelles données, au LHC en particulier, et de nouveaux outils d'analyse devraient dans un futur proche permettre de lever ces incertitudes et de répondre clairement à la question : a-t-on bien observé des pentaquarks et des tétraquarks ?

Une autre interrogation émerge de ces découvertes. Le point commun de tous ces candidats tétraquarks ou pentaquarks observés est la présence de quarks *c*. Aucune structure exotique ne contenant que les trois quarks les plus légers (*u, d, s*) n'a été mise en évidence. Comment l'expliquer ? Aujourd'hui, les physiciens ne peuvent qu'émettre des hypothèses. Les quarks *c* lourds tendraient à stabiliser d'une façon ou d'une autre ces systèmes multiquarks. D'après la chromodynamique quantique, les interactions des quarks ne dépendent pas de leur masse. Il est donc étonnant de voir un tel effet du quark *c*. Les pentaquarks et les tétraquarks nous disent-ils quelque chose de nouveau sur l'interaction forte ? L'avenir nous le dira.

Des pentaquarks encore plus lourds à découvrir

L'étude des multiquarks est loin d'être achevée. Par exemple, il pourrait exister des pentaquarks formés avec des quarks *b*, trois fois plus lourds que les quarks *c*. On trouvera peut-être de telles particules dans les données les plus récentes du LHC. Les physiciens imaginent aussi trouver des pentaquarks contenant seulement un quark lourd *c* ou *b* et non des paires quark-antiquark. Le LHC n'est pas seul dans ce projet, de nombreuses autres installations dans le monde, notamment le laboratoire américain Jefferson, étudient ces systèmes multiquarks ou ont pour projet de les étudier. L'enjeu est une meilleure compréhension de la chromodynamique quantique et de l'interaction forte, l'une des quatre forces fondamentales à l'œuvre dans la nature.

BIBLIOGRAPHIE

Collaboration *LHCb*, Amplitude analysis of $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$ decays, soumis à *Phys. Rev. D*, 2016.

Collaboration *LHCb*, Observation of $J/\psi \phi$ resonances consistent with pentaquark states in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ decays, *Physical Review Letters*, vol. 115, 072001, 2015.

M. Gell-Mann, A schematic model of baryons and mesons, *Physics Letters*, vol. 8, pp. 214-215, 1964.

S. Zweig, An $SU(3)$ model for strong interaction symmetry and its breaking, CERN-TH.401, Preprint CERN Library, 1964.

Deux nouveautés pour les amoureux des mathématiques !

Mathématiques et Mystères

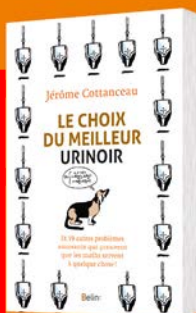
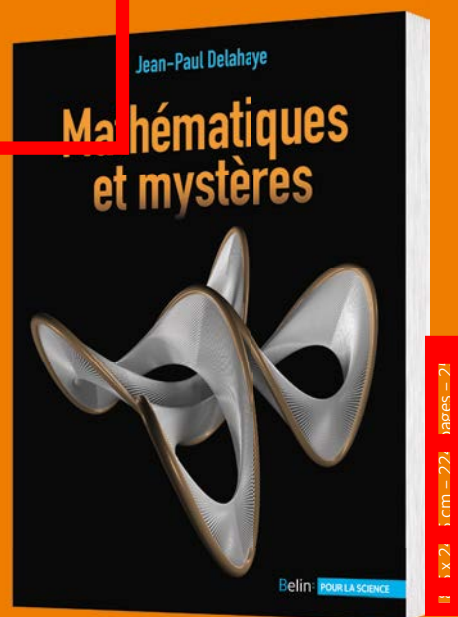
De Jean-Paul Delahaye

Conjectures, paradoxes, objets ou situations aux propriétés bizarres... Les mathématiciens explorent des sujets aussi passionnants que déconcertants.

En partenariat avec **POUR LA SCIENCE**

Derniers livres parus du même auteur :

Merveilleux nombres premiers
La logique, un aiguillon pour la pensée



Le choix du meilleur urinoir

Et 19 autres problèmes amusants qui prouvent que les maths servent à quelque chose !

De Jérôme Cottanceau

Des réponses avec un brin de mauvaise foi et beaucoup de second degré, mais accessible à tous. à LA grande question : mais à quoi ça sert, les maths ?

LA référence pour décrypter l'arbre du vivant, entièrement actualisé !

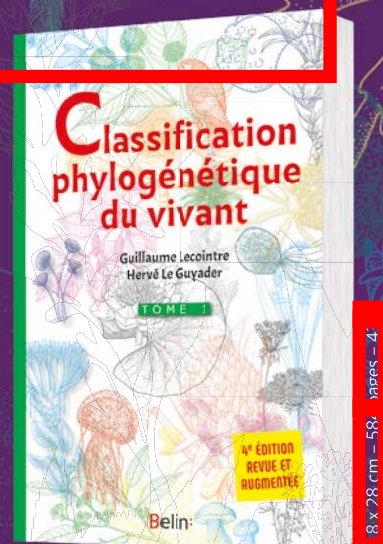
La classification phylogénétique du vivant

Tome 1 – 4^e édition

De Guillaume Lecointre et Hervé Le Guyader

Cette nouvelle édition d'un livre devenu une référence, véritable incursion dans l'arbre du vivant, a été profondément remaniée et actualisée. Ce tome 1 compte 13 arbres, des bactéries aux angiospermes.

Tome 2 à paraître en 2017 : en 16 arbres, l'ensemble des animaux (métazoaires).



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.

Au début, ce n'était qu'une petite rougeur sur le mollet de Nicole Burwell, une femme de quarante ans. Elle était apparue à la fin d'un voyage à Las Vegas avec son fiancé, vers la fin de l'été 2010. «Ce petit point rouge sur ma jambe me démangeait énormément, mais ça ne ressemblait pas à une piqûre de moustique. Il n'y avait pas de papule, pas de saillie», explique-t-elle. Elle prit alors un antihistaminique, de la diphenhydramine disponible sans ordonnance, et dormit pendant les quatre heures du trajet en voiture pour rentrer à Claremont, en Californie. Au réveil, la démangeaison était toujours là. Au cours de la semaine suivante, la rougeur s'est amplifiée, tout comme la démangeaison.

Nicole est donc allée consulter son médecin. L'éruption s'était alors étendue aux deux jambes. Les trois années suivantes, Nicole a lutté contre une éruption pénible qui se déplaçait sur son corps, couvrant les bras et les jambes, les mains, le torse et le dos. Ce n'était pas beau à voir, mais le plus gênant, c'était les démangeaisons.

«J'étais anéantie. Je ne pouvais pas rester assise tranquillement; je n'arrivais pas à me concentrer sur rien. J'en devenais folle!», explique Nicole. Elle a mis en place une routine quotidienne. Après sa journée de travail, elle rentrait dans son appartement climatisé, se déshabillait, prenait deux comprimés de diphenhydramine et se préparait un mélange de bourbon et de Diet 7Up. «Je rentrais et je pleurais, tellement ça me démangeait». Nicole gardait des packs de glaçons sous la main afin de calmer les démangeaisons suffisamment pour pouvoir s'endormir.

Nicole Burwell n'est pas la seule: on estime que un quart des adultes souffriront de démangeaisons durant plus de six semaines au cours de leur vie. Les démangeaisons chroniques peuvent être dues à une des pathologies formant une longue liste: des maladies de la peau telles que l'eczéma ou le psoriasis, l'insuffisance rénale, une lésion nerveuse due à un herpès ou au diabète, des acariens creusant des galeries dans la peau, une réaction allergique à un

L'ESSENTIEL

Des formes chroniques
Le démangeaison apparaît souvent sans cause apparente

Une piqûre d'insecte
Ou une atteinte cutanée similaire amènent les cellules immunitaires à produire de l'histamine, un composé pouvant entraîner des démangeaisons intenses.

L'identification
de pruritogènes (substances induisant des démangeaisons) non histaminiques et une meilleure connaissance des liens entre démangeaison et douleur suscitent l'espoir de nouveaux traitements pour les cas tant aigus que chroniques.



médicament, une grossesse... Les démangeaisons provoquent parfois une grave infirmité et vont même jusqu'à pousser certaines personnes au suicide. Cependant, pour la plupart des médecins, elles ne sont encore qu'une nuisance. « Nous commençons tout juste à constater que les démangeaisons constituent vraiment un énorme problème pour beaucoup de gens », estime Ethan Lerner, chercheur et dermatologue à l'hôpital général du Massachusetts.

Les démangeaisons ne se valent pas toutes. Lorsqu'elles sont aiguës, elles ont une importante fonction : elles font office de sentinelle contre les dangers des insectes rampants et des plantes vénéneuses, que nous écartons en nous grattant (voir l'encadré page 36). Jusqu'à récemment, les chercheurs ne savaient pas bien comment cette sensation exaspérante est engendrée par des substances irritantes au niveau de la peau. Un mystère plus grand encore entoure les formes chroniques de démangeaison, telle celle de Nicole Burwell. Dernièrement, toutefois, les scientifiques ont avancé dans la compréhension de ce mal, ce qui leur laisse entrevoir des traitements contre les démangeaisons chroniques et aiguës. En particulier, ils ont découvert, sur des terminaisons nerveuses de la peau, de nouveaux récepteurs moléculaires qui détectent la présence de pruritogènes (substances provoquant des démangeaisons). Les dernières découvertes montrent aussi qu'une partie du système nerveux est spécialement dédiée aux démangeaisons et qu'elle s'étend de la couche externe de la peau jusqu'aux centres nerveux supérieurs.

La forme de démangeaison la mieux connue est celle due à une simple piqûre de moustique. Après avoir prélevé son repas de sang, l'insecte laisse derrière lui des composés et des enzymes que notre système immunitaire reconnaît comme étrangers et déclenche ainsi une réaction à où la peau a été piquée. Des cellules immunitaires libèrent des cytokines, de minuscules messagers chimiques, qui amplifient la réaction immunitaire. Une petite irritation est ressentie au niveau de la peau, pas vraiment une démangeaison, mais suffisante pour que l'on se

L'AUTEURE



Stephanie SUTHERLAND, docteur en neurobiologie, se consacre au journalisme

et à la communication dans le domaine des neurosciences. Elle réside en Californie.

Le lien entre
démangeaison
et douleur
se révèle bien plus
complexe qu'on
ne le pensait

gratte. Ce geste endommage la couche externe, protectrice, de l'épiderme. Des cellules immunitaires libèrent alors de l'histamine, une molécule pruritogène majeure, ainsi que d'autres composés ayant le même effet. L'histamine active des récepteurs présents sur les minuscules terminaisons des nerfs sensitifs de la peau, déclenchant ainsi la sensation familière de démangeaison.

Il n'y a pas seulement l'histamine

En fait, l'histamine se révèle jouer un rôle moins important dans les démangeaisons qu'on ne le pensait. Il y a encore une décennie, les récepteurs de l'histamine étaient les seuls « détecteurs » connus liés aux démangeaisons. Les médicaments antihistaminiques restent donc jusqu'à présent le traitement classique des démangeaisons, à côté des stéroïdes utilisés pour empêcher l'inflammation.

Toutefois, les chercheurs suspectent depuis longtemps que des composés autres que l'histamine déclenchent d'autres types de démangeaisons, principalement parce que les antihistaminiques sont inefficaces chez de nombreux patients. Les antihistaminiques sont utiles pour certaines réactions allergiques, mais pas pour la plupart des démangeaisons chroniques, explique Ethan Lerner. Les médecins augmentent peu à peu les doses, et le traitement ne fonctionne que parce qu'il endort ou engourdit la personne. C'est ce qu'a connu Nicole Burwell.

Pour trouver de nouveaux récepteurs liés à la démangeaison, des scientifiques sont allés à la quête de substances qui déclenchent des démangeaisons sans que l'histamine intervienne.

La première découverte fut le pois de Mascate (*Mucuna pruriens*), une plante servant d'ingrédient dans les poudres de poil à gratter vendues dans les magasins de farces et attrapes. « Au contact de la peau, l'histamine produit une pure sensation de démangeaison », explique Ethan Lerner. « Mais les patients souffrant d'eczéma décrivent une sensation de picotement ou de brûlure. C'est ce que provoque le pois de Mascate. »

La démangeaison joue le rôle de sentinelle, qui nous alerte par exemple de la présence d'insectes ou de végétaux vénéneux. L'histamine, produite par une réaction immunitaire après une piqûre d'insecte, est une molécule bien connue pour entraîner des démangeaisons. Elle interagit avec un récepteur H1 présent sur un neurone de la peau **A**. À son tour, H1 active un canal ionique, le récepteur TRPV1, qui s'ouvre. Cela déclenche l'activation du neurone et induit la sensation de démangeaison. On a découvert récemment une famille de récepteurs liés aux démangeaisons, notés Mrgpr. Ils réagissent par exemple à la chloroquine, un composé antipaludéen, et activent les neurones selon un mécanisme similaire **B**.

NEURONES DE DÉMANGEAISON

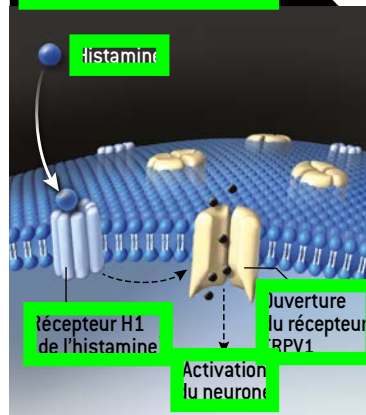
1 Facteurs déclenchants externes

Les piqûres d'insectes, des composés provenant de végétaux et d'autres substances déclenchent une réaction immunitaire.

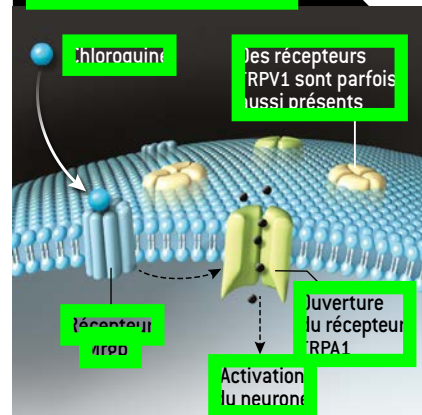
2 Facteurs déclenchants internes

Des mastocytes et d'autres cellules immunitaires réagissent à des agressions externes en libérant des pruritogènes, c'est-à-dire des composés provoquant des démangeaisons.

A Activation par l'histamine

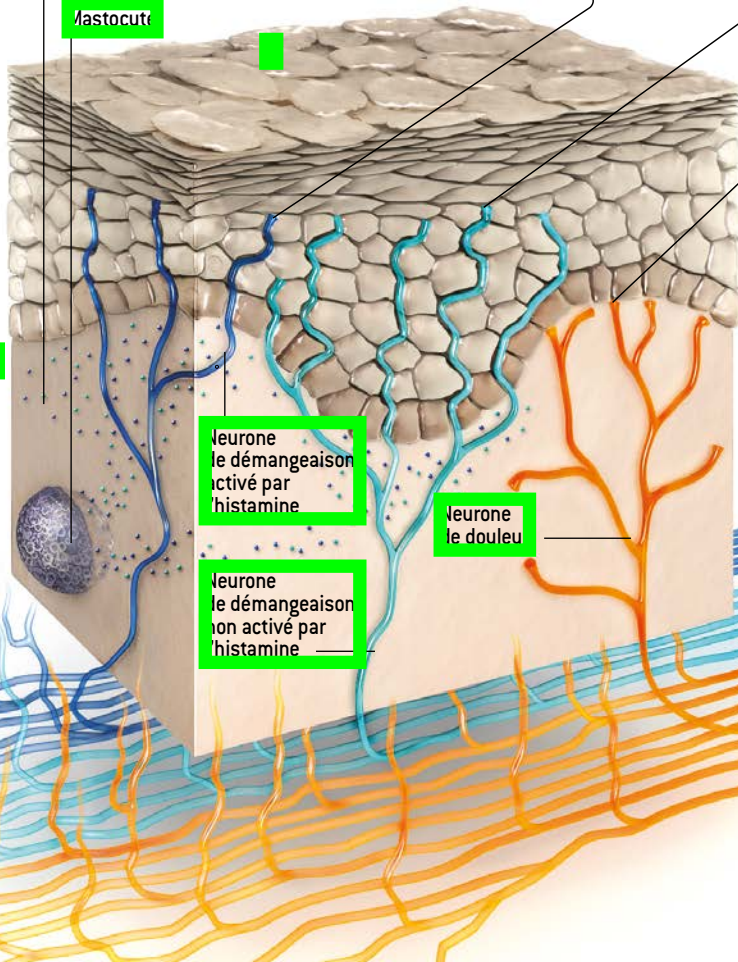


B Activation non histaminique



Pruritogènes

Mastocyt

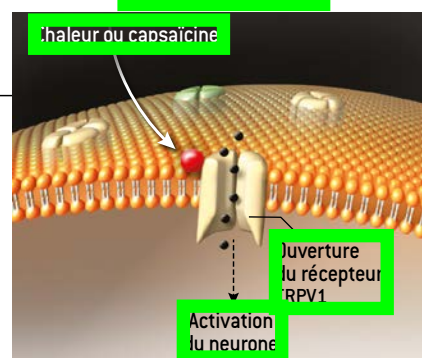


Neurone de démangeaison activé par l'histamine

Neurone de démangeaison non activé par l'histamine

Neurone de douleur

NEURONES DE DOULEUR



Transmission vers les centres cérébraux de la démangeaison

Transmission vers les centres cérébraux de la douleur

Démangeaison et douleur

Le récepteur TRPV1 (un canal ionique) remplit deux fonctions. Il parsème la surface des neurones de douleur sensibles à la chaleur ou à la capsaïcine (par exemple), mais aussi la surface des neurones liés aux démangeaisons.

Dans les années 1950, Walter Shelley, un pionnier de la recherche sur les démangeaisons, émit l'hypothèse que le facteur de démangeaison du pois de Mascate était une enzyme, une protéase qu'il nomma mucunaïne. En 2008, Ethan Lerner confirma cette intuition en découvrant que la mucunaïne active un récepteur nommé PAR2 (*Protease-Activated Receptor 2*), présent dans la peau et les cellules nerveuses. Certaines protéases, dont la mucunaïne, peuvent couper une minuscule partie de la protéine PAR2, ce qui active le récepteur.

L'apport du poil à gratter et de la chloroquine

Cette découverte a conduit à l'idée que les protéases et les fragments de peptides qu'elles produisent sont des médiateurs clés de la démangeaison, comme PAR2 et d'autres récepteurs. Les protéases sont très répandues, notamment dans la salive d'insectes et dans les sécrétions bactériennes, ce qui explique peut-être pourquoi les piqûres d'insectes et les infections démangent tant.

Le second indice permettant de trouver de nouveaux récepteurs intervenant dans les démangeaisons a été fourni par la chloroquine, un médicament contre le paludisme. Ce médicament prévient la maladie, mais provoque des démangeaisons. Cet effet secondaire, que les antihistaminiques sont impuissants à soulager, amène de nombreux Africains à risquer de refuser la chloroquine. Mais cette molécule est devenue un précieux outil pour l'étude des démangeaisons.

En 2001, Xinzhong Dong, qui travaillait au laboratoire de David Anderson à l'institut de technologie de Californie, a découvert une famille de récepteurs, activés par des composés chimiques inconnus, nommés Mrgpr (pour *Mas-related G protein-coupled receptors*). Certains d'entre eux n'ont été trouvés que dans des neurones sensoriels, suggérant qu'ils détectent des stimuli externes, mais dont la nature restait un mystère.

Xinzhong Dong appliqua de la chloroquine sur des cellules contenant des Mrgpr, afin de voir si ces récepteurs interviennent dans les démangeaisons. Au cours de travaux présentés en 2009, Xinzhong Dong

désormais à l'université Johns Hopkins) et David Anderson ont créé des souris transgéniques dépourvues de l'un des Mrgpr présents dans les cellules sensorielles, le récepteur MrgprA3. Les souris normales développaient une forte réaction de grattage au traitement par la chloroquine, mais pas les souris transgéniques dépourvues du récepteur. « En l'absence de MrgprA3, les animaux ne ressentent tout simplement pas la démangeaison. C'était cela notre percée », raconte Xinzhong Dong. Deux autres protéines de la famille des Mrgpr réagissant aux pruritogènes ont également été découvertes.

Ainsi, grâce à la chloroquine et au pois de Mascate, les chercheurs ont découvert

Des populations distinctes de neurones

véhiculeraient différents types de démangeaison

les premiers nouveaux détecteurs liés à la démangeaison depuis la description des récepteurs de l'histamine, dans la seconde moitié du XX^e siècle. Cependant, comme l'explique Diana Bautista, de l'université de Californie à Berkeley, la question n'était pas d'identifier le récepteur sensible à la chloroquine ou au pois de Mascate, mais de découvrir ce qui, dans la peau, active les neurones de la démangeaison dans les cas de démangeaisons chroniques où l'histamine n'intervient pas. Les substances en question restent à déterminer.

Pour mieux comprendre les démangeaisons, les chercheurs étudient aussi la façon dont le système nerveux y réagit. Depuis les

années 1960, les scientifiques ont compris que divers neurones sensibles à la douleur, qui détectent des stimuli potentiellement nocifs, se distinguent des autres neurones sensoriels. Certains sont spécialisés pour détecter la chaleur, d'autres le froid et d'autres encore la pression mécanique. Mais qu'en est-il des démangeaisons ? Des neurones sensibles à la douleur sont-ils impliqués ou existe-t-il des neurones spécialisés en démangeaison ? Et si oui, en existe-t-il de différents types ?

Selon Diana Bautista, il existe un lien intime entre les démangeaisons et la douleur. Quand la douleur d'une blessure en cours de guérison s'atténue, elle laisse dans son sillage une démangeaison, comme c'est le cas pour certains antalgiques, et la douleur produite lorsqu'on se gratte peut faire disparaître la démangeaison. Certains ont donc émis l'idée qu'un stimulus faible (par exemple un pull en laine qui gratte) activerait les mêmes récepteurs et les mêmes cellules que ceux associés à la douleur, une activation légère induisant des démangeaisons et des stimuli plus puissants provoquant une douleur. Pourtant, aucune quantité d'histamine (ni de pois de Mascate ou de chloroquine) ne produit une douleur. Inversement, des stimuli douloureux ont pour effet des douleurs d'intensité variable, mais pas de démangeaisons. Par ailleurs, des neurones sensibles à la douleur sont présents bien au-delà de l'épaisseur de la peau, seul lieu du corps où sont ressenties les démangeaisons.

Au cours des dernières années, la théorie de l'intensité s'est effacée et la plupart des chercheurs étaient d'avis que la démangeaison est transmise par des nerfs et des récepteurs spécifiques. De plus, ils ont émis l'hypothèse de l'existence de très nombreux types de neurones sensibles aux démangeaisons, chacun détectant des stimuli différents. Ethan Lerner estime que la vraie question posée par le poil à gratter était la suivante : existe-t-il plus d'un type de démangeaisons, comme il existe plusieurs types de douleurs ? Selon lui, la réponse est oui.

En 2003, des chercheurs allemands et suédois ont cependant jeté le doute sur l'existence de neurones spécialisés dans

es démangeaisons. Ils avaient découvert que des cellules nerveuses humaines, qui réagissent à l'histamine, sont également activées par la chaleur douloureuse et la capsaïcine, l'ingrédient qui donne aux piments rouges leur goût piquant. Cette double réactivité suggérait que des cellules nerveuses supposées liées aux démangeaisons contenaient le récepteur pour la capsaïcine, caractéristique des neurones sensibles à la douleur et nommé TRPV1 (*Transient Receptor Potential Vanilloid type 1*).

Des récepteurs de la douleur impliqués

Si des neurones associés aux démangeaisons contenaient le récepteur TRPV1 de détection de la douleur, comment pourraient-ils être spécifiques des démangeaisons? Allan Basbaum, de l'université de Californie à San Francisco, a trouvé qu'en dépit de sa réputation de récepteur pour la douleur, TRPV1 est également indispensable pour les démangeaisons induites par l'histamine. Le récepteur de l'histamine

se révèle fonctionner conjointement avec TRPV1 pour inciter les neurones à transmettre une impulsion électrique nerveuse, le « potentiel d'action ». D'autres agents de démangeaison, non histaminiques, compliquaient toutefois le tableau, car ils n'agissaient pas *via* TRPV1.

Pendant ce temps, Diana Bautista, qui a passé sa carrière à étudier les récepteurs TRP, recherchait les molécules qui transmettent les signaux de démangeaison non histaminiques. Les résultats d'Allan Basbaum, indiquant que TRPV1 intervient dans le déclenchement des démangeaisons induites par l'histamine, lui a fourni un indice: peut-être d'autres récepteurs TRP apparentés interviennent-ils dans d'autres types de démangeaisons?

Elle s'est concentrée sur un autre récepteur associé à la douleur, TRPA1, qui détecte les composés chimiques inflammatoires et l'huile de moutarde. Elle a trouvé en 2009 que TRPA1 est nécessaire pour la démangeaison induite par la chloroquine. Diana Bautista et Xinzhong Dong ont alors décidé de collaborer, puis ont montré que les

récepteurs TRPA1 et MrgprA3 fonctionnent de concert pour que les neurones soient activés par la chloroquine. « Cette découverte a renforcé l'idée que des populations distinctes de neurones véhiculent différents types de démangeaisons », explique Diana Bautista. Cela a aussi donné une nouvelle piste pour un traitement potentiel des démangeaisons, qui consisterait à inhiber le récepteur TRPA1.

A ce stade, il y avait des études suffisamment nombreuses pour conclure que les récepteurs associés à la douleur sont également liés aux démangeaisons. Cependant, on ne savait toujours pas si les cellules sensorielles individuelles étaient spécialisées dans la transmission des démangeaisons ou si des cellules sensibles à la douleur pouvaient transmettre d'une façon ou d'une autre les deux types de stimuli. Xinzhong Dong s'est attaqué à la question en 2013. Son équipe a créé des souris transgéniques dépourvues des neurones présumés spécifiques des démangeaisons, à savoir ceux contenant le récepteur des démangeaisons nouvellement décrit.

Les conférences
de la **Cité des sciences et de l'industrie**

la Cité des sciences et de l'industrie Entrée libre dans la limite des places disponibles
les mardis à 19h

Cycle des coopérations inattendues dans le vivant

La coopération intervient à toutes les échelles du vivant, du monde microbien aux groupes d'animaux sociaux. Elle s'affirme aussi là où on ne l'attend pas...

10 janvier L'exception humaine?
17 janvier Quand les araignées tissent des liens
24 janvier La coopération microbienne, moteur de l'évolution

programme complet sur cite.sciences.fr

avec le soutien de **SCIENCE** **culture** **plus**

Pourquoi se gratte-t-on ?

Vous ressentez une démangeaison et il n'y a aucune autre solution : vous devez vous gratter. La démangeaison est alors calmée, du moins momentanément. Mais pourquoi ?

Le soulagement est dû à une activité du système nerveux central.

Le grattage provoque

au niveau des terminaisons nerveuses dans la moelle épinière, une libération de molécules antalgiques propres au corps – des opioïdes endogènes – qui ont aussi pour effet d'atténuer la démangeaison. De la moelle épinière, des neurones envoient des signaux qui inhibent une région du cerveau nommée cortex cingulé antérieur, qui est fortement activée par les démangeaisons ; quand cette région se calme, la sensation diminue elle aussi. La sensation du grattage n'est pas

particulièrement agréable et pourtant, quand elle soulage une démangeaison, elle est ressentie comme gratifiante. Gil Yosipovitch, de l'université Temple à Philadelphie, en a découvert la raison au cours d'une étude menée en 2013. Avec ses collègues, il a fait appel à l'imagerie cérébrale chez des sujets pendant qu'ils se grattaient pour soulager une démangeaison aiguë et a observé que cela activait le système de récompense du cerveau (comme c'est le cas, notamment, lors de la prise de stupéfiants).

En particulier, les régions liées au plaisir, à un besoin impérieux et à la motivation se sont activées, notamment le striatum, le noyau accumbens et le cortex préfrontal. Le grattage activait le système de récompense plus intensément chez les personnes souffrant de démangeaisons chroniques que chez les sujets en bonne santé, ce qui indique qu'au fil du temps, la récompense du grattage peut s'amplifier. Cette découverte reflétait la nature addictive du grattage et la raison pour laquelle nous sommes si impuissants à y résister en cas de démangeaison. Les démangeaisons chroniques instaurent « un cercle vicieux de démangeaisons et de grattage », explique Gil Yosipovitch. Son principal conseil aux médecins : « Ne dites pas aux patients de

ne pas se gratter. L'effet est si puissant qu'ils ne peuvent s'en empêcher. »

Pourquoi une démangeaison nous incite-t-elle si impérieusement à gratter la zone concernée ? On peut y voir une raison évolutive : la démangeaison envoie un signal d'alarme et le grattage déloge les intrus et alerte le système immunitaire. Selon Gil Yosipovitch, nos ancêtres vivaient dans un monde très prurigène, rempli de plantes et d'insectes représentant une réelle menace. Cela explique la nature contagieuse de la démangeaison : quand nous voyons quelqu'un se gratter, nous commençons à nous gratter nous aussi, à titre préventif sans doute.

- S. S.

MrgprA3. En l'absence de ces cellules, les souris ont perdu la capacité de ressentir les démangeaisons, tandis que leur sensibilité à la douleur restait intacte.

Xinzhong Dong devait toutefois encore prouver que les capteurs des démangeaisons étaient réellement réservés à ces sensations et qu'ils ne détectaient pas la douleur. Il parvint à obtenir des souris dépourvues de récepteurs TRPV1 dans tous les neurones, sauf dans ceux proposés comme médiateurs des démangeaisons. Lorsqu'on activait le récepteur TRPV1 à l'aide de la capsaïcine (un stimulus normalement douloureux), les souris n'ont ressenti que des démangeaisons, et pas de douleur. Ce qui confirme l'existence de neurones spécifiques des démangeaisons et que ces cellules utilisent certains des capteurs présents aussi dans les neurones sensibles à la douleur.

Encore beaucoup d'inconnu

Toutes ces avancées sont dues à des études de neurones sensoriels qui innervent la peau. En fait, les dernières recherches montrent que les cellules de la peau elles-mêmes contribuent aux démangeaisons en libérant des pruritogènes qui activent les neurones

BIBLIOGRAPHIE

L. Misery et S. Ständer [éds.], *Pruritus*. Springer, 2016.

M. Bautista et al., Why we scratch an itch : The molecules, cells and circuits of itch, *Nature Neuroscience*, vol. 17(2), pp. 175-182, 2014.

G. Yosipovitch et S. G. Kwatra, *Living with Itch : A Patient's Guide*, Johns Hopkins University Press, 2013.

concernés. Les circuits complexes de la démangeaison s'étendent aussi à la moelle épinière, où l'on a récemment mis en évidence des neurones et des molécules de signalisation spécifiques. En outre, des scientifiques utilisent l'imagerie cérébrale pour mieux comprendre comment l'activité neurale produit la sensation de démangeaison.

Quant à Nicole Burwell, elle a finalement été libérée de ses démangeaisons chroniques à la fin de 2013, après avoir consulté un deuxième médecin – un éminent dermatologue qui soigne des patients souffrant de démangeaisons intraitables et inexplicables. Un test cutané approfondi de recherche d'allergies sur le dos a montré que Nicole Burwell était allergique à un conservateur présent dans des produits cosmétiques et d'hygiène. La rougeur et les démangeaisons ont disparu lorsqu'elle a commencé à n'utiliser que des produits approuvés.

Le cas de Nicole Burwell illustre à quel point les démangeaisons sont mal connues des professionnels de la santé : un simple test a permis de trouver une solution facile, mais seulement après trois ans de souffrances. Il souligne aussi à quel point il est important de trouver les causes sous-jacentes de ce mal, dont la complexité moléculaire n'est pas encore totalement élucidée. ■

Maison de la Chimie
\\ 9 février 2017

FORUM HORIZON CHIMIE



Entrée libre et gratuite | 31e édition | 9h >> 18H

Venez rencontrer les grandes entreprises de la chimie !

Recherche de stages, discussion avec des professionnels de la chimie, conférences, simulation d'entretiens d'embauches, correction de CV, et bien plus encore...

28bis rue Saint-Dominique 75007 Paris |  Invalides
www.horizon-chimie.fr

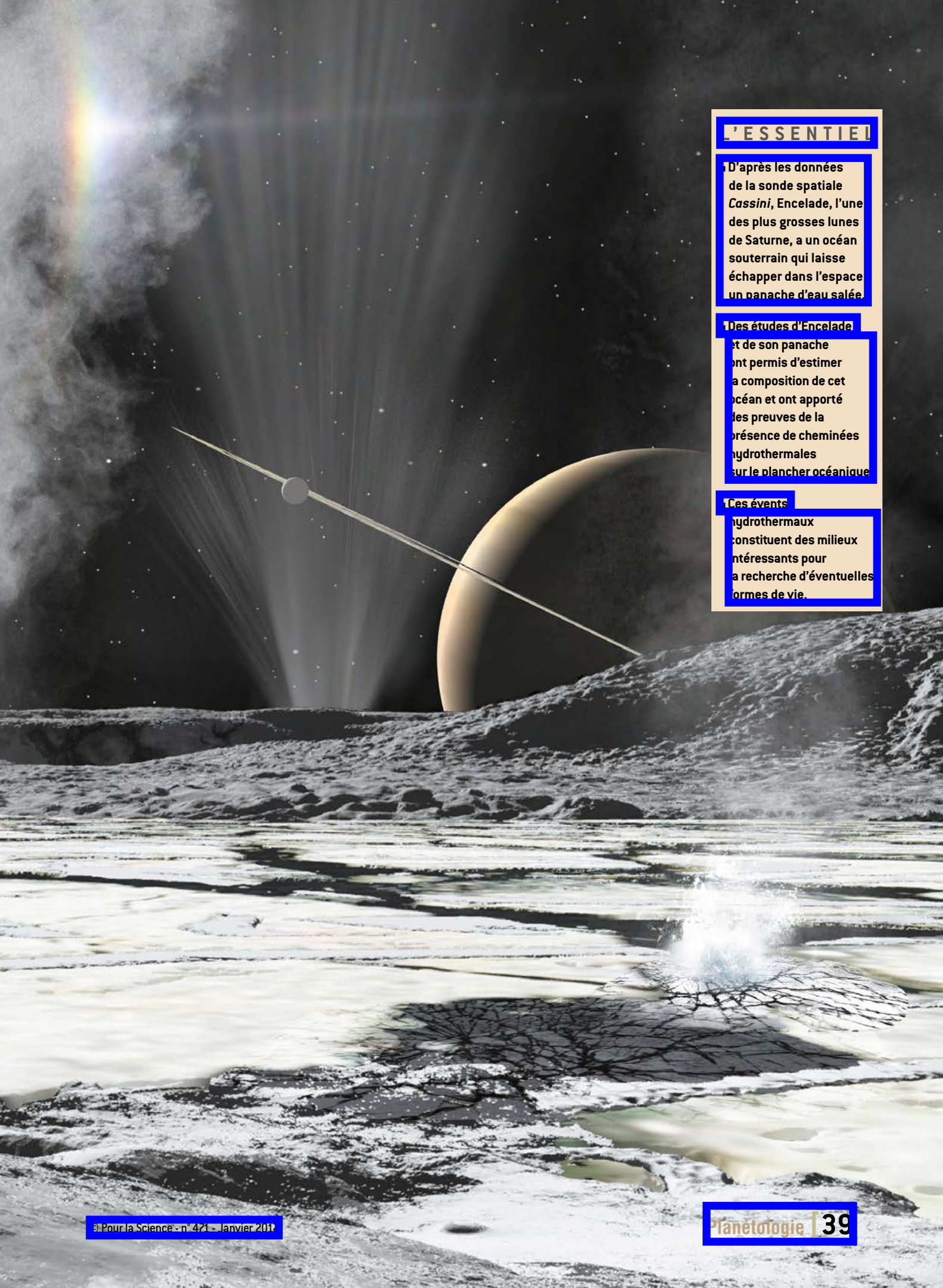
Sous l'océan d'Encelade

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.

Qui croirait qu'au fond de l'océan Atlantique, à mi-chemin entre les Bermudes et les îles Canaries, se trouve une cité animée ? Et pourtant, dans l'obscurité qui règne à près de un kilomètre sous la surface éclairée par le Soleil, la nature a édifié une métropole sous-marine, un complexe de tours de calcaire hautes comme des gratte-ciel abritant des multitudes d'escargots, de crabes et de moules. Les tours se forment par précipitation des minéraux contenus dans l'eau chaude alcaline qui jaillit des événements hydrothermaux parsemant le fond de l'océan. Les biologistes ont découvert cette « Cité perdue » exotique à l'aide de submersibles et de caméras contrôlées à distance au début des années 2000, et ils l'étudient depuis afin de comprendre comment les cheminées hydrothermales peuvent, si loin de la lumière vitale du Soleil, faire vivre des écosystèmes florissants.

Entre-temps, les planétologues qui exploitent la sonde spatiale *Cassini* ont fait dans le Système solaire externe une série de découvertes spectaculaires suggérant fortement que des cheminées hydrothermales semblables à celles de la



L'ESSENTIEL

D'après les données de la sonde spatiale *Cassini*, Encelade, l'une des plus grosses lunes de Saturne, a un océan souterrain qui laisse échapper dans l'espace un panache d'eau salée.

Des études d'Encelade

et de son panache ont permis d'estimer la composition de cet océan et ont apporté des preuves de la présence de cheminées hydrothermales sur le plancher océanique.

Ces événements

hydrothermaux constituent des milieux intéressants pour la recherche d'éventuelles formes de vie.

LES AUTEURS



Frank POSTBERG
est planétologue
aux universités
de Heidelberg
et de Stuttgart,
en Allemagne.



Gabriel TUBIE
est planétologue
au CNRS et travaille
au Laboratoire
de planétologie
et géodynamique

(CNRS-universités de Nantes
et d'Angers).



Horsten DAMBECK
docteur en
physique diplômé
de l'université
d'Osnabrück,
en Allemagne

est écrivain de science spécialisée
en astronomie et planétologie.

Cité perdue existent aussi dans l'océan souterrain d'Encelade, une petite lune glacée de Saturne. Serait-il possible que la vie soit présente là-bas également ?

Bien sûr, la possibilité d'une vie extraterrestre est très alléchante pour les scientifiques, mais ces derniers seraient de toute façon passionnés pour les cheminées hydrothermales, qu'elles leur fassent miroiter l'existence d'une vie extraterrestre ou non. Les données qui suggèrent une activité hydrothermale sur cette lune lointaine fournissent également des informations cruciales pour connaître la composition et la longévité de l'océan d'Encelade. Sans cette activité hydrothermale, ces secrets auraient de bonnes chances de rester enfouis à jamais sous la croûte gelée, comme cela risque d'être le cas avec d'autres lunes dotées d'océans – par exemple Europe, lune de Jupiter – pour lesquelles on ne dispose pas de preuves solides d'une activité hydrothermale.

Une chaleur interne difficile à expliquer

Plus fondamentalement, l'existence même des cheminées hydrothermales d'Encelade constitue une énigme irrésistible pour les chercheurs. Outre l'eau, l'ingrédient le plus important nécessaire à une activité hydrothermale est à l'évidence la chaleur, mais les entrailles brûlantes de cette lune glacée sont difficiles à expliquer.

Encelade a un diamètre d'environ 500 kilomètres ; c'est assez peu pour une lune, et beaucoup trop petit pour retenir la chaleur primordiale qu'a laissée sa formation. Une autre source de chaleur doit donc être à l'œuvre dans ses profondeurs. Découvrir comment Encelade produit sa chaleur interne et la maintient pourrait révolutionner notre compréhension des lunes glacées et de leur possibilité d'héberger des formes de vie.

On a commencé à soupçonner la présence d'un océan sur Encelade en 2005, environ un an après l'arrivée de *Cassini* dans le système saturnien. La sonde a alors observé un énorme panache de vapeur d'eau et de grains de glace s'élevant à plusieurs centaines de kilomètres dans l'espace, et originaire du terrain tectoniquement actif qui entoure le pôle sud de la lune.

Grâce à une série de survols de *Cassini*, les chercheurs ont montré que le panache

est formé par de multiples jets émanant de quatre fissures linéaires, tellement plus chaudes que leur environnement glacial qu'elles luisaient dans l'infrarouge. Les scientifiques de la mission ont nommé « rayures de tigre » ces fissures et ont déterminé que leurs jets étaient la source de l'immense anneau ténu de particules de glace (l'anneau E) qui ceint le système d'anneaux classique de Saturne. Cependant, la plupart des grains de glace émis dans les jets ont une vitesse insuffisante pour rejoindre cet anneau et retombent sur Encelade sous la forme d'une fine neige poudreuse. Sur la base des congères d'une centaine de mètres de haut qui recouvrent une bonne partie de son hémisphère sud, les chercheurs estiment qu'Encelade projette de l'eau dans l'espace depuis au moins dix millions d'années.

Initialement controversée, l'« hypothèse océanique » expliquant les jets d'Encelade a été confirmée par une longue série d'études de *Cassini* qui établissent irréfutablement la présence d'un océan global et souterrain. Plus récemment, une analyse du champ gravitationnel, de la topographie de surface et de la légère modulation de la rotation d'Encelade a permis à Ondřej Čadež, de l'université Charles, à Prague, et ses collaborateurs (dont l'un de nous, Gabriel Tobie) de préciser la taille et l'étendue de l'océan.

Ces travaux suggèrent que la croûte aurait une épaisseur avoisinant 35 kilomètres au niveau de l'équateur d'Encelade, mais ne dépassant pas 5 kilomètres aux alentours du pôle sud. Le fond de l'océan se trouverait 60 à 70 kilomètres environ sous la surface, ce qui signifie qu'Encelade contiendrait une quantité d'eau équivalente à un dixième de l'océan Indien. Et en utilisant les données recueillies par *Cassini* en 2009 et 2011, l'un de nous (Frank Postberg) a montré que son eau est alcaline et contient du chlorure de sodium (du sel de table) dans le panache éjecté. Cela signifie que l'océan est probablement posé sur le noyau rocheux d'Encelade et qu'il en lessive les minéraux.

L'indice crucial pour affirmer la présence de cheminées hydrothermales a été obtenu par l'analyseur de poussière cosmique CDA (pour *cosmic dust analyser*) de *Cassini* en 2004, avant même que la sonde n'atteigne Saturne et ne découvre le panache d'Encelade. Quand *Cassini* s'est approchée de Saturne, des

pluies inattendues de nanoparticules véloces ont frappé le CDA comme de la grenaille. Des années plus tard, après la découverte du panache, Frank Postberg a examiné la distribution en tailles et en fréquences des nanoparticules dans les données du CDA. Il a remarqué qu'aucune ne dépassait 20 nanomètres et que toutes étaient essentiellement composées de silice (SiO_2), principal composant du quartz et du sable de plage.

Des nanoparticules de silice dans les jets

En utilisant des simulations pour déterminer les trajectoires les plus probables décrites par les nanoparticules de silice, Hsiang-Wen Hsu, de l'université du Colorado à Boulder, a pressenti qu'elles provenaient des parties externes de l'anneau E de Saturne. Et comme nous savions que cet anneau est engendré par Encelade, la découverte suggérait fortement que les nanoparticules avaient pour origine la lune glacée. Leur composition s'est révélée être la preuve patente de l'activité hydrothermale d'Encelade.

De la silice pure éjectée d'Encelade, voilà qui était surprenant : la seule source plausible de ce composé se trouverait en profondeur sous la glace et l'océan, dans le noyau rocheux de la lune, où le silicium se trouve en général chimiquement lié à d'autres éléments tels que le fer et le magnésium. Il est concevable que le broyage par collision de ces minéraux (quand les cailloux s'entrechoquent violemment et se brisent en morceaux de plus en plus petits) puisse créer des nanoparticules de silice. Mais ces particules devraient présenter une fourchette de tailles beaucoup plus large que celle observée par *Cassini*.

Il ne restait qu'une seule autre explication naturelle : les nanoparticules ont pu se cristalliser à partir d'une solution supersaturée d'eau alcaline très chaude et riche en silice s'écoulant à travers des roches, c'est-à-dire sortant de cheminées hydrothermales très semblables à celles que l'on trouve sur Terre dans la Cité perdue.

Sur le site de la Cité perdue, ainsi que probablement sur le plancher océanique d'Encelade, l'eau très chaude (plus de 90-100 °C) absorbe de la silice en remontant à travers les roches silicatées. Lorsqu'elle débouche dans l'océan environnant et se refroidit, sa capacité à transporter les



ENCELADE (au centre), vue d'une distance de deux millions de kilomètres, est en orbite à l'intérieur de l'anneau E de Saturne. Cet anneau est formé par le panache glacé qui s'échappe de la lune.

minéraux absorbés diminue : il s'ensuit la formation de nanoparticules de silice. À ce stade, d'autres molécules pourraient s'attacher aux nanoparticules, ce qui les ferait grossir, les alourdirait et entraînerait ainsi à terme leur dépôt sur le fond – à moins que l'eau ne soit alcaline et pas trop salée. Cette relation entre la taille/longévité des nanoparticules et la température/chimie de leurs berceaux aqueux offre aux chercheurs une fenêtre sans précédent sur les conditions qui règnent dans l'océan d'Encelade.

À la suite de la détection initiale des nanoparticules par *Cassini*, une équipe dirigée par Yasuhito Sekine, de l'université de Tokyo, a effectué des expériences en laboratoire pour confirmer le mécanisme de formation des nanoparticules et révéler les conditions régnant dans les profondeurs d'Encelade. Ces chercheurs ont trouvé que de l'eau à une température supérieure ou égale à 90 °C, ainsi qu'une alcalinité supérieure à celle des océans terrestres assortie d'une salinité légèrement inférieure, seraient optimales pour que se forment de petites nanoparticules de silice de grande longévité.

D'après leurs expériences, l'alcalinité de l'océan d'Encelade doit être comprise

entre celle de l'eau de mer terrestre et celle des produits d'entretien ménager ammoniacaux. Si elle était plus alcaline que l'ammoniacale, la grande solubilité de la silice qui s'ensuivrait ne permettrait pas aux nanoparticules de se former. Et si l'eau était moins alcaline que l'eau de mer terrestre, il faudrait qu'elle soit extrêmement chaude pour que du dioxyde de silicium se dissolve en quantité suffisante et que se forment des nanoparticules de silice.

Un océan habitable ?

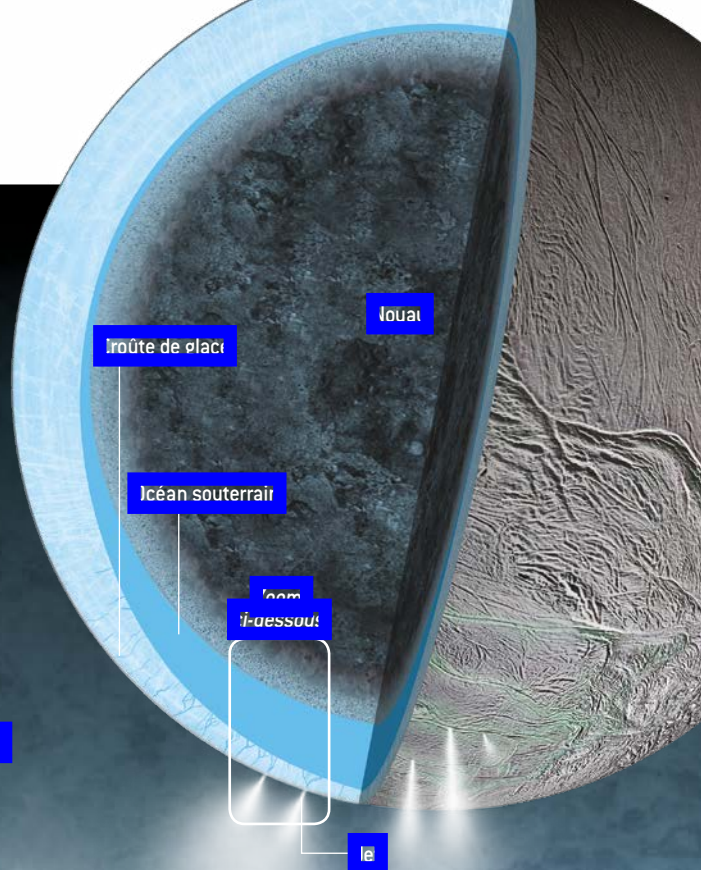
Mis bout à bout, les travaux de Frank Postberg, de Hsiang-Wen Hsu et de l'équipe de Yasuhito Sekine laissent penser que les riches écosystèmes de la Cité perdue et d'autres cheminées hydrothermales terrestres auraient des chances de survivre et prospérer si on les déménageait dans les profondeurs d'Encelade. En d'autres termes, l'océan de cette lointaine lune glacée semble potentiellement habitable.

Bien sûr, il se peut qu'Encelade soit aujourd'hui inhospitalière et que les nanoparticules de silice détectées par *Cassini* ne soient que les vestiges d'une activité hydrothermale ancienne ayant pris fin depuis longtemps. Mais les travaux de Yasuhito Sekine et d'autres collaborateurs suggèrent que tel n'est pas le cas.

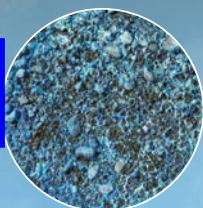
En effet, dans les expériences de laboratoire et les modélisations numériques, les particules de silice fraîchement formées

PLONGÉE DANS LES PROFONDEURS D'ENCELADE

Les scientifiques considèrent Encelade, la lune glacée de Saturne, comme un havre potentiel de vie extraterrestre depuis que, en 2005, la sonde *Cassini* a vu des jets de vapeur d'eau émanant du pôle sud de la lune. Des études ultérieures au moyen de *Cassini* ont établi que ces jets sont liés à un océan souterrain (à droite) et qu'ils contiennent des minéraux lessivés du noyau rocheux de la lune, ainsi que des particules de silice vraisemblablement formées par des événements hydrothermaux situés sur le plancher océanique (ci-dessous). Sur Terre, de tels événements ont peut-être abrité les premières formes de vie ; aujourd'hui, ils constituent des écosystèmes particuliers dans les profondeurs océaniques privées de lumière. Les scientifiques se demandent s'il n'en est pas de même sur Encelade. Même s'il se révèle un jour que les événements hydrothermaux de cette lune sont dépourvus de toute vie, ils auront fourni de nouvelles pistes pour étudier les processus internes de ce corps céleste glacé.

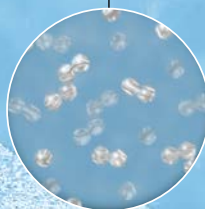


L'eau s'écoule à travers le noyau rocheux et poreux



Événement hydrothermal

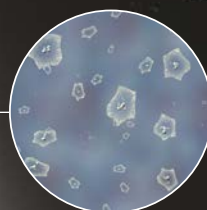
Océan souterrain



Croûte de glace

Issus

Jet



Vapeur d'eau et grains microscopiques contenant des inclusions de silice

NEES DANS LA MER, PROPULSÉES DANS L'ESPACE

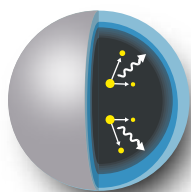
Les particules de silice observées par *Cassini* précipiteraient au sein de fluides très chauds et riches en minéraux entrant en contact avec de l'eau froide. Les particules se formeraient dans des eaux légèrement plus alcalines que celles des mers terrestres (de l'eau beaucoup plus salée ou moins alcaline entraverait leur formation ou leur ascension). Une fois formées, les particules remontent à travers l'océan avant de percoler dans la croûte glacée d'Encelade et traverser ses fissures et ses cavités. À mesure que l'eau en ascension s'approche de la surface exposée au vide, la pression diminue et la fait pétiller comme du champagne, expulsant des jets de grains de glace chargés en particules. Une partie des grains échappent à la gravité de la lune et s'érodent en orbite autour de Saturne, libérant les particules de silice dans l'espace interplanétaire.

CARTOGRAPHIER L'INTERIEUR D'UNE LUNE

En se fondant sur son activité hydrothermale supposée, ainsi que sur les observations du champ gravitationnel d'Encelade, de sa rotation, du relief de sa surface et de la composition de ses jets, les chercheurs ont établi un tableau assez détaillé de l'intérieur du corps céleste. L'océan souterrain s'étend partout, pris en sandwich entre un noyau rocheux poreux et une croûte gelée dont l'épaisseur varie de 35 kilomètres à l'équateur à moins de 5 kilomètres au pôle sud. Au total, il représenterait une quantité d'eau équivalant à un dixième de l'océan Indien. On ne sait pas encore exactement comment cette minuscule lune produit suffisamment de chaleur pour maintenir cet océan à l'état liquide.

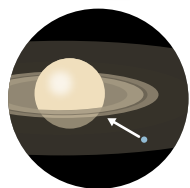
COMBIEN DE TEMPS L'OCEAN PEUT-IL PERDURER ?

Pour que la vie telle que nous la connaissons existe sur Encelade, son océan doit être là depuis longtemps. S'il s'agit au contraire d'un océan transitoire, qui ne persiste que quelques dizaines de millions d'années ou qui passe par des cycles successifs de gel et de dégel, la lune a peu de chances d'abriter des formes de vie. La longévité de l'océan est intimement liée à la source de chaleur responsable de l'activité hydrothermale de la lune. Les planétologues ont identifié trois sources possibles de chaleur pour Encelade, chacune ayant des conséquences différentes sur la longévité de l'océan.



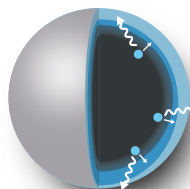
Chauffage par la radioactivité

Les isotopes radioactifs libèrent de la chaleur en se désintégrant. Encelade semble comparable à la Terre en termes d'abondance des isotopes, mais cette lune est tellement petite que cette source s'épuiserait vite et que sa chaleur s'évacuerait en peu de temps : l'océan aurait gelé depuis longtemps.



Chauffage par effets de marée

L'attraction gravitationnelle de Saturne et des lunes voisines provoque des marées qui déforment l'intérieur d'Encelade. Les frottements ainsi induits pourraient en principe chauffer la lune des milliards d'années durant. Mais l'influence de Saturne pourrait aussi modifier l'orbite de la lune de telle façon que le chauffage interne s'en trouve réduit, et Encelade se serait complètement refroidie en un million d'années ou moins.



Chauffage par serpentinisation

Les réactions de « serpentinisation » entre l'eau et la roche peuvent libérer de la chaleur, mais, comme avec le chauffage radioactif, cette chaleur diminue à mesure que la roche est transformée par les réactions chimiques. Cependant, les frottements de marée pourraient renforcer et prolonger la serpentinisation en exposant régulièrement de nouvelles roches à l'eau qui percole à travers le noyau poreux de la lune.

ont en moyenne 4 nanomètres de diamètre, et ne grossissent que sur des durées de quelques mois au moins à quelques années au plus. Les données du CDA montrent que les nanoparticules d'Encelade ont en général un diamètre compris entre 4 et 16 nanomètres, sans jamais dépasser 20 nanomètres. Par conséquent, les nanoparticules recueillies par *Cassini* ont dû se former peu de temps avant d'être mesurées. Sinon, elles seraient plus grosses qu'observé. C'est à ce jour la meilleure preuve que, à l'heure où vous lisez ces lignes, des événements hydrothermaux sont actifs sur le plancher océanique d'Encelade.

Du plancher océanique

aux profondeurs de l'espace

À partir de la mécanique ainsi mise au jour, nous pouvons maintenant reconstituer le voyage d'une nanoparticule depuis le fond de l'océan souterrain d'Encelade jusqu'au Système solaire élargi. Après s'être formée à l'interface entre les fluides riches en silice qui jaillissent des événements et l'océan environnant plus froid, une nanoparticule va passer de quelques mois à quelques années à remonter une épaisseur d'eau d'environ 60 kilomètres.

La surface de l'océan d'Encelade atteinte, la nanoparticule se fraye un chemin vers le haut par les fractures emplies d'eau qui zèbrent les quelques kilomètres de croûte glacée du pôle sud. L'eau de mer étant plus dense que la glace solide environnante, son ascension devrait s'arrêter à moins de un kilomètre sous la surface d'Encelade. Mais là, l'« effet champagne » donne un coup de pouce supplémentaire : tandis que l'eau (qui contient du dioxyde de carbone dissous) monte et que sa pression décroît, des bulles de dioxyde de carbone naissent. Ces dernières aident l'eau à remonter jusqu'à, peut-être, une centaine de mètres de la surface d'Encelade.

Là, nous soupçonnons qu'elle remplit des cavités creusées dans la glace. Si près du vide spatial, les bulles de dioxyde de carbone qui éclatent et les basses pressions mettent ces masses d'eau en effervescence, d'où des projections de nuages de fine brume et de vapeur d'eau. Les gouttelettes de brume gèlent rapidement en formant des grains de glace micrométriques, qui incorporent les nanoparticules de silice comme des raisins dans un petit pain. La masse nuageuse s'élève par des canaux qui traversent la glace superficielle cassante et sèche, comme le long d'une cheminée. Une partie de la vapeur d'eau gèle sur les murs de glace, libérant la chaleur latente que nous voyons sous la forme d'une lueur infrarouge émanant des rayures de tigre de la surface d'Encelade. La vapeur qui ne gèle pas entraîne les grains chargés de particules vers la surface, les projetant dans l'espace comme des fontaines.

La plupart des grains du panache vont retomber à la surface sous forme de neige, mais ceux qui sont animés des vitesses les plus grandes échappent à Encelade pour aller s'accumuler dans l'anneau E. Là, du gaz ionisé érode les grains de glace et libère les nanoparticules de silice. Celles-ci accumulent alors une charge électrique communiquée par le gaz ionisé et les électrons libres, et sont alors à la merci des très intenses champs électromagnétiques de Saturne. Enfin, accélérées par les vents solaires, certaines des nanoparticules atteignent des vitesses allant jusqu'à un million de kilomètres à l'heure (environ 0,1 % de la vitesse de la lumière) et filent vers les confins du Système solaire. Il est même possible qu'une

l'intérieur d'Encelade serait aujourd'hui complètement gelé.

La petite taille de la lune et sa faible gravité lui confèrent également une dynamique interne très différente de celle de planètes aussi grosses que la Terre : au sein d'Encelade, les plus basses pressions et les températures plus modérées limitent la compaction et la consolidation du matériau qui constitue son noyau, ce qui permet à l'eau de circuler à travers la roche poreuse et de produire des processus hydrothermaux au cœur même de la lune. Ce tableau est bien différent de celui de la Terre, où la rapide augmentation de la pression et de la température avec la profondeur a pour effet de restreindre la circulation de l'eau aux derniers kilomètres de croûte avant la surface.

Le chauffage de marée est peut-être assez puissant pour porter localement l'eau à plus de 100 °C dans le noyau poreux d'Encelade

petite fraction des échappées atterrit dans l'espace intersidéral.

Pour élaborer, élégant et, à notre avis, véridique que soit ce scénario, il ne résout pas ce qui est devenu le mystère central d'Encelade : quelle est la source de la chaleur interne nécessaire au maintien de son océan dynamique ? Cette chaleur, qui est essentielle pour que l'eau reste liquide, ne peut clairement pas être fournie par le Soleil. Les rayons de cette étoile sont environ 99 % plus faibles sur Encelade qu'au voisinage de la Terre, ce qui confère à la lune glacée une température de surface proche de celle de l'azote liquide (-196 °C).

La moitié environ de la chaleur interne de la Terre provient de la lente désintégration des isotopes radioactifs de l'uranium, du thorium et du potassium. Ce chauffage radiogénique entretient depuis des milliards d'années des températures de plusieurs milliers de degrés à l'intérieur de la Terre. Bien qu'Encelade contienne probablement des concentrations comparables d'éléments radiogéniques, avec seulement 500 kilomètres de diamètre, cette minuscule lune perd sa chaleur interne beaucoup plus efficacement que la Terre. En l'absence d'une source complémentaire de chaleur,

On pourrait s'attendre à ce que le lessivage du noyau d'Encelade accélère son refroidissement, évacuant toute chaleur radiogénique et interdisant les hautes températures nécessaires à la formation de nanoparticules de silice. Mais il y a encore une source possible d'énergie, en dehors du chauffage dû à la radioactivité, qui pourrait expliquer l'activité hydrothermale en cours sur Encelade : le chauffage par les marées.

De la même façon que les marées océaniques de la Terre résultent de l'attraction exercée par la Lune et le Soleil sur notre planète, l'intérieur d'une planète ou d'une lune qui suit une orbite excentrique non circulaire se déforme périodiquement au fil de son déplacement. Ces déformations, dues à la variation des forces gravitationnelles subies par le corps en orbite, créent une friction dans ses couches internes, une friction qui à son tour produit de la chaleur.

Le chauffage de marée serait particulièrement puissant dans le noyau poreux et imprégné d'eau d'un corps tel qu'Encelade. Et effectivement, les données de *Cassini* indiquent clairement que les forces de marée exercées par Saturne ont une forte influence sur la minuscule lune : la luminosité de ses jets, donc la quantité de



matériau éjecté, varie périodiquement au fil de la révolution d'Encelade autour de la planète aux anneaux. À l'évidence, les fissures-cheminées qu'emprunte la vapeur d'eau chargée de fines particules liquides et solides pour traverser la glace ont elles-mêmes leurs parois tour à tour resserrées et écartées par les effets de marée, ce qui engendre aussi des quantités notables de chaleur.

Océan éphémère ou persistant ?

Le que nous ignorons, c'est si l'océan observé aujourd'hui est un phénomène transitoire limité à quelques dizaines de millions d'années, ou une caractéristique persistante de la lune présente depuis des centaines de millions, voire des milliards, d'années. Tout dépend depuis combien de temps l'action des marées chauffe l'intérieur d'Encelade, ce qui dépend à son tour de la façon dont la



une interagit avec Saturne ainsi qu'avec la lune voisine Dioné.

Afin de comprendre ces interactions de marée, on peut considérer le système familier Terre-Lune, qui présente des ressemblances avec celui de Saturne et Encelade. La Lune provoque des marées sur Terre, et Encelade en fait de même sur Saturne. Dans l'océan terrestre, ces écoulements de marée dissipent progressivement leur énergie sous l'effet des frottements sur les littoraux et le plancher océanique, ce qui ralentit la rotation de la Terre sur elle-même de façon mesurable. Dans une centaine d'années, le jour terrestre sera ainsi 2 millisecondes plus long qu'il ne l'est aujourd'hui, et la Terre aura dissipé suffisamment d'énergie de marée lunaire pour que l'orbite de la Lune soit repoussée de près de 4 mètres.

De la même façon, les frottements de marée à l'intérieur de Saturne modifient de façon infinitésimale la rotation de la planète géante tout en augmentant la

LES FLUIDES HYDROTHERMAUX

qui percolent à travers l'intérieur chaud d'Encelade pourraient former des dépôts minéraux sur le plancher océanique, comme sur cette vue d'artiste.

distance d'Encelade à Saturne et l'excentricité de son orbite. Des excentricités plus grandes se traduisent par des effets de marée plus prononcés (et donc plus de chauffage) sur Encelade. En contrepartie, la dissipation au sein d'Encelade tend à réduire progressivement l'excentricité orbitale. Les premières estimations théoriques suggéraient qu'Encelade ne provoquerait qu'une faible friction de marée sur Saturne, ce qui aurait pour conséquence que son orbite perdrait son excentricité et donc que la durée de vie de l'océan, maintenu au chaud par les marées, ne dépasserait pas le million d'années.

Récemment, Valéry Lainey, de l'observatoire de Paris, et ses collègues (dont Gabriel Tobie) ont analysé en détail les mouvements des lunes de Saturne afin de poser des contraintes plus précises sur l'ampleur des frottements de marée à l'intérieur de la planète géante. Ils ont trouvé que ces frottements au sein de Saturne sont au moins 10 fois supérieurs à ce que prédisent les modèles simples. Si elle est exacte, cette valeur plus élevée signifierait que l'excentricité de l'orbite d'Encelade est stable et durable, et que les marées seraient assez fortes pour maintenir un océan pendant des dizaines de millions d'années au moins, et potentiellement bien plus longtemps. Or plus l'océan d'Encelade peut persister longtemps, plus grande est la probabilité que la vie puisse y émerger et prospérer.

Une autre source de chaleur :

la serpentinisation

En dehors du chauffage de marée, une seconde source possible de chaleur est à considérer. Quand l'eau percole à travers la roche silicatée, elle peut hydrater et changer la nature cristalline de certains minéraux, ce qui libère d'importantes quantités de chaleur par un processus dit de serpentinisation. Renforcée par la circulation aisée de l'eau à travers le noyau rocheux et poreux riche en silicates d'Encelade, la serpentinisation pourrait dégager une puissance de plusieurs gigawatts et constituer une part importante du bilan calorifique interne d'Encelade.

Tant qu'il y a de nouveaux minéraux en contact avec l'eau qui circule, cette source de chaleur va persister. Mais

au bout de quelques millions d'années, quand la roche finit par être complètement serpentinisée, elle cesse de produire de la chaleur et, en l'absence d'autres influences telles que les frottements de marée, devrait se refroidir. Il semble donc que la serpentinisation ne soit pas, à elle seule, en mesure de maintenir un océan global assez longtemps pour qu'une chimie prébiotique puisse voir le jour.

La serpentinisation pourrait tout de même contribuer à de possibles milieux biologiques dans les profondeurs d'Encelade. Sur Terre, les scientifiques ont observé des processus de serpentinisation qui alimentent les événements hydrothermaux de la Cité perdue et d'autres sites sous-marins. En plus de produire de la chaleur, ces réactions produisent de l'hydrogène, du méthane et d'autres composés organiques qui assurent la subsistance des microbes formant la base de la chaîne alimentaire de leurs écosystèmes isolés et privés de rayonnement solaire. En étudiant de tels organismes, certains chercheurs se sont demandé si la vie a vraiment besoin du Soleil.

Une réflexion renouvelée sur les possibilités de vie extraterrestre

À la fin des années 1980, Michael Russell, alors à l'université de Strathclyde en Écosse, a avancé avec des collègues l'hypothèse que des sources hydrothermales alcalines pourraient avoir été le berceau des premiers organismes vivants sur la jeune Terre. Même si l'on n'en connaissait aucun sur Terre à cette époque, Michael Russell affirmait que de tels sites offrieraient un environnement relativement élémentaire et néanmoins riche en énergie où la chimie prébiotique aurait pu former les précurseurs des membranes, des métabolismes et des molécules autoreproductrices modernes.

Peu de personnes avaient pris l'idée suffisamment au sérieux pour l'examiner ou en débattre en dehors de cercles universitaires très restreints. Mais la découverte de la Cité perdue a ravivé l'intérêt envers l'hypothèse de Michael Russell, la catapultant au premier plan des débats contemporains sur l'origine de la vie. Désormais, la découverte d'un environnement similaire au sein d'Encelade (et la possibilité qu'il en existe sur

d'autres lunes glacées, telles qu'Europe, autour de Jupiter) modifie une nouvelle fois notre réflexion sur les possibilités de vie ailleurs dans le Système solaire. La vie n'est plus nécessairement confinée aux surfaces chaudes et humides de planètes rocheuses éclairées par le Soleil : elle pourrait s'épanouir dans un éventail beaucoup plus large d'environnements, en étant alimentée pour tout ou partie par la chaleur des radio-isotopes, de la serpentinisation et des forces de marée.

Encelade et Europe pourraient n'être que la partie émergée de l'iceberg, car selon divers indices, il pourrait aussi exister des océans souterrains sur Ganymède et Callisto (des lunes de Jupiter), ainsi que sur Titan et Mimas (des lunes de Saturne), et même sur la planète naine Pluton. Les chercheurs qui, comme nous, s'intéressent à la vie extraterrestre ne font que commencer à s'atteler à ces possibilités spéculatives et à leurs implications, mais il semble de plus en plus probable que nous ayons jusqu'à présent largement sous-estimé la fécondité biologique de l'Univers.

Pour l'heure, nous n'avons pas la certitude que l'intérieur des lunes glacées ait vraiment tous les ingrédients nécessaires à une habitabilité extraterrestre. La durée et l'intensité de l'activité hydrothermale au sein d'Encelade restent une question ouverte, et la possibilité d'une activité hydrothermale au sein d'Europe n'est guère plus qu'une spéculation. La Nasa, comme son homologue l'ESA, l'Agence spatiale européenne, explorent activement ces questions et programment des missions vers les lunes glacées de Jupiter, qui pourraient partir à la recherche de panaches semblables à celui d'Encelade à la fin des années 2020 ou au début des années 2030.

Cassini va continuer à étudier Encelade jusqu'à la fin de sa mission en 2017, quand elle s'écrasera dans les profondeurs de Saturne afin de ne pas risquer de contaminer Encelade ou une autre lune glacée avec des formes de vie terrestre. À terme, nous pourrions y envoyer une nouvelle génération de sondes qui se poseront sur Encelade et y effectueront des analyses *in situ*, voire y prélèveront des échantillons pour les rapporter sur Terre. Pour l'instant, de telles missions n'existent que dans les espoirs et les rêves des astrobiologistes, mais peut-être plus pour très longtemps. ■

BIBLIOGRAPHIE

1. J. Lainey *et al.*, New constraints on Saturn's interior from *Cassini* astrometric data, *Icarus*, vol. 281, pp. 286-296, 2017.

2. J. Čadež *et al.*, Enceladus's internal ocean and ice shell constrained from *Cassini* gravity, shape, and libration data, *Geophysical Research Letters*, vol. 43(11), pp. 5653-5660, 2016.

3. J. Irvais et G. Schubert, Keeping Enceladus warm, *Icarus*, vol. 250, pp. 32-42, 2015.

4. W. Hsu *et al.*, Ongoing hydrothermal activities within Enceladus, *Nature*, vol. 519, pp. 202-210, 2015.

5. M. Běhouňková *et al.*, Tidally-induced melting events as the origin of south-pole activity on Enceladus, *Icarus*, vol. 219, pp. 655-664, 2012.

6. J. Porco, Le monde tumultueux d'Encelade, *Pour la Science*, n° 326, février 2009.

La science-fiction passée au crible de la science !



PAR LES
CHRONIQUEURS
DE LA RUBRIQUE
SCIENCE & FICTION
DE **SCIENCE**

Un ouvrage idéal pour
découvrir les sciences
qui gouvernent notre
monde... en compagnie
de Godzilla, Superman
et des extraterrestres !

Belin:

inscrivez-vous à la newsletter sciences sur editions-belin.com

La guêpe émeraude et

Christie Wilco

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.

J'ignore si les blattes rêvent, mais j'imagine que si c'est le cas, les guêpes émeraude *Ampulex compressa* et leurs proches voisins figurent en bonne place dans leurs cauchemars. Ces petites guêpes tropicales solitaires manipulent le système nerveux de leurs proies de façon à ce que ces dernières servent de garde-manger vivant à leur progéniture fraîchement éclos. C'est la matière de certains films d'horreur, presque littéralement : ces espèces de guêpe ont inspiré les terrifiants *chestbusters* (les « éclateurs de poitrine ») de la franchise *Alien*.

L'histoire est à la fois simple et extravagante : la guêpe femelle prend le contrôle du système nerveux de la blatte qu'elle donne à manger à sa progéniture, laquelle blatte perd alors toute crainte ou volonté d'échapper à son destin. Mais contrairement à ce que l'on voit sur le grand écran, ce n'est pas un virus incurable qui transforme une blatte bien vivante en un zombie décérébré, mais un venin. Pas n'importe quel venin non plus : un venin spécifique, qui agit comme une drogue sur le système nerveux de la blatte.

En leur cœur, les systèmes nerveux, qu'il s'agisse de ceux des humains ou des insectes, ne sont que des assemblages de neurones. Il existe potentiellement des millions de composés venimeux pouvant activer ou

désactiver les neurones. Il ne devrait donc pas être surprenant que certains venins puissent agir sur le système nerveux central qui, chez les humains notamment, est soigneusement protégé. Certains de ces venins sont injectés loin du cerveau et parviennent à faire leur chemin en franchissant les barrières physiologiques de protection, telles que la barrière hématoencéphalique chez l'homme. D'autres sont injectés directement dans le cerveau, comme dans le cas de la guêpe émeraude et sa blatte-hôte qu'elle transforme en zombie.

La blatte paralysée, puis transformée en zombie

Les guêpes émeraude constituent un exemple magnifique, bien que terrifiant, de la façon dont les venins neurotoxiques peuvent faire beaucoup plus que paralyser. Elles sont étudiées depuis bon nombre d'années par les biologistes, en particulier par Frédéric Libersat et ses collègues à l'université Ben Gourion, en Israël.

La guêpe, dont la taille est à peu près la moitié de celle de sa victime, commence son attaque par le dessus ; elle fonde sur la blatte et la saisit avec ses pièces buccales,



sa blatte-zombie



LES GUEPES ÉMERAUDE

(ici *Ampulex compressa*) sont des espèces éblouissantes, tant sur le plan visuel que sur le plan évolutif. Leur venin leur permet de contrôler le comportement d'autres insectes, afin d'assurer l'alimentation de leur progéniture.

L'ESSENTIEL

La guêpe émeraude se sert de blattes vivantes pour nourrir ses larves.

Les guêpes de ce type ont un venin particulier qui, injecté dans la tête d'une blatte, modifie le comportement de l'insecte et son métabolisme.

L'insecte ainsi zombifié constituera un repas vivant lorsque la larve éclosa de l'œuf déposé par la guêpe sur la blatte.

De nombreuses autres espèces de guêpes ont des venins qui leur permettent de parasiter des araignées, des chenilles, voire des larves d'autres guêpes.

L'AUTEURE



Christie WILCOX
est postdoctorante
en biologie
cellulaire
et moléculaire
à l'université

de Hawaii, où ses recherches
portent sur les animaux
venimeux. Elle se consacre
par ailleurs à la vulgarisation
scientifique.

Cet article est tiré et adapté de
son ouvrage *Venomous : How
Earth's Deadliest Creatures
Mastered Biochemistry*, édité
par Scientific American/Farrar,
Straus and Giroux, LLC
©Christie Wilcox, 2016.

andis qu'elle introduit dans le thorax
de sa proie, entre les deux pattes anté-
rieures, son ovipositeur (l'aiguillon qui
lui permet de déposer ses œufs, et aussi
d'injecter du venin). Cette piqûre ne prend
que quelques secondes et les composants
venimeux fonctionnent vite. La blatte est
ainsi temporairement paralysée, ce qui
laisse à la guêpe le temps de piquer sa proie
une seconde fois avec plus de précision.
Avec son long aiguillon, elle injecte son
venin neurotoxique dans deux régions
de ses ganglions cérébraux, l'équivalent
du cerveau chez l'insecte.

Une piqûre de haute précision

L'aiguillon de la guêpe est si bien adapté
à sa victime qu'il est sensible à l'endroit
où il se trouve à l'intérieur de la tête de
la blatte. À partir de signaux mécaniques
et chimiques, l'aiguillon cherche à tâtons
son chemin à travers la tête de la blatte
et l'enveloppe ganglionnaire (l'équiva-
lent pour l'insecte d'une barrière hémato-
encéphalique), jusqu'à trouver l'endroit
exact visé. Les deux régions cérébrales
ciblées ont beaucoup d'importance pour
la guêpe : quand, dans des expériences,
on les retirait préalablement de la blatte,
la guêpe prenait beaucoup de temps à
rechercher, avec son aiguillon encastré,
les parties cérébrales manquantes.

Les ganglions de la blatte étant piqués, le
contrôle cérébral commence. Tout d'abord,
la victime fait sa toilette, et rien d'autre :
dès que les pattes antérieures de la blatte
récupèrent de la paralysie temporaire provo-
quée par la piqûre sur le corps, une routine
méticuleuse de toilettage commence, qui
dure environ une demi-heure. Les scien-
tifiques ont montré que ce comportement
est spécifique du venin : un percement des
ganglions cérébraux, un stress général de
la blatte ou un contact sans piqûre avec
la guêpe ne provoquaient pas la même
impulsion hygiénique. Ce besoin soudain
de propreté peut aussi être provoqué par
un afflux de dopamine dans les ganglions
nerveux de la blatte, et l'on sait aujourd'hui
que le composé de type dopamine du
venin est la cause de ce comportement
de toilettage compulsif.

On ignore si ce toilettage est une carac-
téristique bénéfique du venin constituant
une adaptation, ou s'il s'agit simplement
d'un effet secondaire. D'après certains
chercheurs, ce comportement assure que
le garde-manger dont bénéficiera la fragile
progéniture de la guêpe sera dépourvu
de champignons et de bactéries ; d'autres
chercheurs pensent qu'il permet d'occuper
la blatte, le temps que la guêpe poursuive
et termine son œuvre.

La dopamine est l'un de ces produits
chimiques intrigants que l'on retrouve
dans le cerveau d'une grande variété

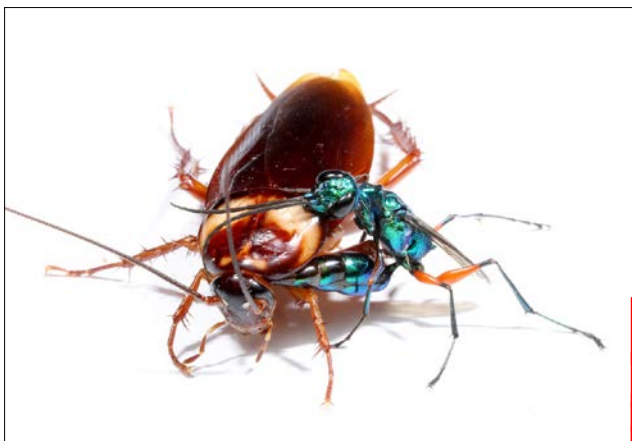
UNE BLATTE ENTIÈREMENT SOUMISE À LA GUEPE ET À SA PROGENITURE

Deux piqûres

Une première piqûre dans un ganglion nerveux du thorax paralyse
pendant une ou deux minutes la blatte, le temps pour la guêpe
d'effectuer sa seconde piqûre (*ci-dessous*), qui doit être beaucoup
plus précise : celle-ci vise deux parties déterminées des ganglions
cérébraux de la tête.

Mise à l'abri dans un terrier

La blatte, après envenimation par la seconde piqûre de la guêpe,
devient une sorte de mort-vivant : elle ne cherche pas à fuir,
n'oppose aucune résistance et effectue des mouvements lents
et désordonnés. La guêpe en profite pour traîner sa proie
jusqu'au terrier qu'elle a trouvé.



l'animaux, et qui exerce des effets vitaux. Dans nos têtes, elle fait partie du « système de récompense » : des afflux de dopamine sont déclenchés par des choses agréables. Comme la dopamine nous procure une sensation de bien-être, elle peut être fantastique, mais elle est également liée à des comportements addictifs et aux sensations obtenues avec des drogues telles que la cocaïne. Il nous est impossible de savoir si une blatte ressent aussi une bouffée d'euphorie quand son cerveau est inondé de dopamine, mais je préfère penser que c'est le cas, étant donné la triste fin que l'insecte va connaître...

Pendant que la blatte soignée, la guêpe l'abandonne pour rechercher un endroit approprié. Elle a besoin d'un terrier où elle puisse laisser son œuf et la blatte-zombie, et il lui faut un peu de temps pour trouver le bon endroit et le préparer. Quand elle revient, une trentaine de minutes plus tard, le venin a fait son effet – la blatte perdue toute volonté de s'enfuir.

En principe, ce stade est temporaire : si l'on retire de la blatte envenimée l'œuf qu'y dépose la guêpe, c'est-à-dire avant que la larve puisse éclore, se nourrir et se métamorphoser, la zombification disparaît en une semaine. Malheureusement pour

Le venin n'engourdit pas les sens de la blatte, mais modifie la façon dont son cerveau y réagit

la blatte envenimée, ce laps de temps est trop long. Avant que son cerveau ait une chance de revenir à la normale, la guêpe nouveau-née s'est déjà rassasiée et a tué son hôte.

Les capacités motrices de la blatte envenimée restent intactes, mais l'insecte ne semble tout bonnement pas disposé à les utiliser. Ainsi, le venin n'engourdit pas les sens de l'animal – il modifie la façon dont son cerveau y réagit. Les scientifiques ont même montré que les stimuli qui déclenchent normalement un comportement de fuite, comme lorsqu'on touche les ailes ou les pattes de la blatte, parviennent toujours au cerveau de l'insecte ; ils ne suscitent simplement pas de réaction comportementale. En fait, le venin modifie certains neurones de telle façon qu'ils deviennent moins actifs et réactifs. C'est ce qui conduit chez la blatte à ce soudain manque de crainte et cette absence de résistance à se faire enterrer et dévorer vivante.

Cette activité du venin nécessite des toxines qui ciblent certains canaux ioniques présents sur la membrane des neurones, les canaux chlorure GABA-dépendants. Le GABA, ou acide γ -aminobutyrique, est l'un des plus importants neurotransmetteurs

Un œuf fixé au bon endroit

Après avoir placé la blatte dans un terrier, la guêpe pond et colle l'œuf à la base d'une patte, endroit qui a peu de chance d'être perturbé par les éventuels mouvements résiduels de la proie. Quand la larve (dans le cercle rouge) éclôt, elle perce la cuticule de l'insecte et se nourrit d'hémolymphes.

Une croissance larvaire dans l'abdomen de la blatte

Quelques jours après, la larve pénètre dans l'abdomen qu'elle évapore peu à peu. Environ un mois plus tard, elle s'enveloppe d'un cocon (ci-contre) pour se métamorphoser en une jeune guêpe adulte, qui sortira de la blatte et entamera un nouveau cycle de vie parasitoïde.

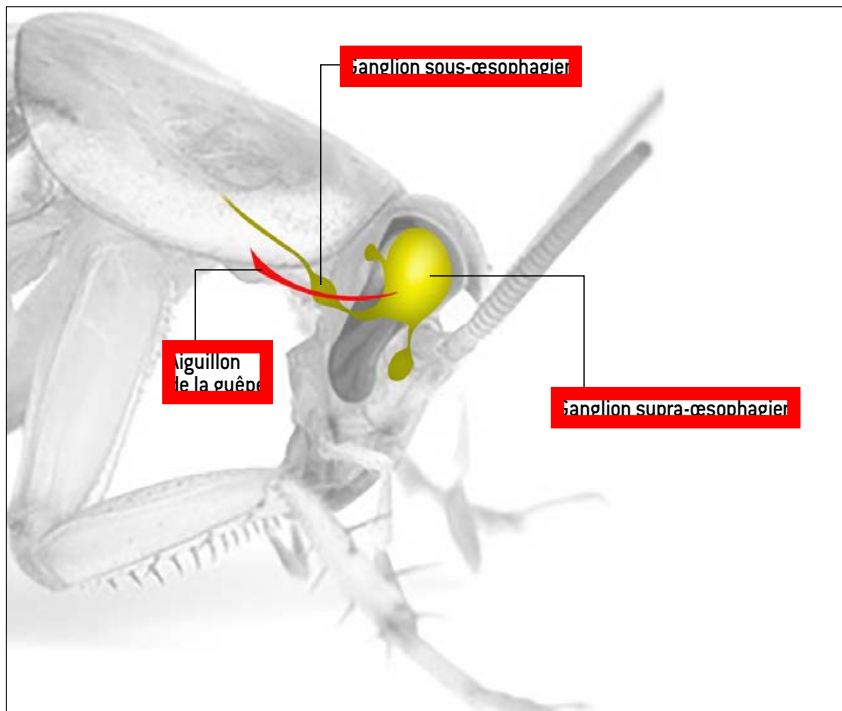


dans le système nerveux des animaux. C'est un neurotransmetteur inhibiteur. Si l'on assimile l'activité neuronale à une fête, alors le GABA est un rabat-joie. En effet, en déclenchant l'ouverture des canaux chlorure, il diminue la capacité d'un neurone à s'activer.

Expliquons comment. Quand les canaux chlorure s'ouvrent, les ions chlorure (Cl^-) peuvent traverser la membrane du neurone. Que se passe-t-il lorsque, de surcroît, un canal sodium (Na^+) s'ouvre, processus qui constitue normalement le début de

C'est ce système d'engourdissement qui met en œuvre la guêpe pour soumettre la blatte à sa volonté. Son venin contient du GABA et deux autres composés qui activent aussi les canaux chlorure, la β -alanine et la taurine. Ces dernières agissent également de façon à empêcher l'absorption du GABA par les neurones, ce qui prolonge l'effet inhibiteur.

Si ces composés du venin sont capables d'inhiber l'activité cérébrale qui ferait fuir la blatte, ils ne peuvent pas se diriger d'eux-mêmes vers les parties appropriées des ganglions cérébraux. Aussi la guêpe doit-elle les injecter directement au bon endroit. Heureusement pour elle, grâce à une opportune bizarrerie de la nature, le venin qui zombifie le cerveau de la blatte produit aussi la paralysie temporaire nécessaire à la préparation de l'injection dans la tête. En effet, le GABA, la β -alanine et la taurine inactivent aussi temporairement les neurones moteurs. Par conséquent, la guêpe n'a besoin que d'un seul venin pour réaliser deux tâches très différentes.



Une proie devenue calme et passive.

au métabolisme ralenti

La proie étant désormais calme et passive, la guêpe peut refaire son plein d'énergie en brisant les antennes de la blatte et en aspirant par les extrémités coupées un peu d'hémolymphe, le liquide nutritif qui baigne le corps de l'insecte (une sorte de sang, mais qui ne transporte pas d'oxygène). Puis elle conduit sa victime jusqu'à sa dernière demeure en utilisant ce qu'il reste d'une antenne, à la façon d'un cavalier qui guide son cheval avec ses rênes. Une fois à l'intérieur de son terrier, elle fixe un œuf à la base d'une patte de la blatte, puis ferme le terrier à l'aide de petits objets ou débris (feuilles, petits cailloux...).

Comme si cette manipulation cérébrale n'était pas suffisamment cruelle, le venin de la guêpe produit un autre effet sur la blatte : il ralentit son métabolisme. La blatte vivra ainsi suffisamment longtemps pour être dévorée encore fraîche et pleine de nutriments.

Une façon de mesurer le métabolisme est d'évaluer la quantité d'oxygène consommée au cours du temps, puisque tous les animaux brûlent de l'oxygène pour

Précision chirurgicale

Lorsqu'elle pique une seconde fois sa blatte, la guêpe émeraude vise deux régions précises dans la tête de l'insecte : le ganglion cérébral supra-œsophagien et le ganglion sous-œsophagien. C'est cette seconde piqûre qui transforme la blatte en un insecte mort-vivant.

Une cascade de réactions formant l'activation neuronale ? Comme les ions négatifs tendent à accompagner des ions positifs, les ions chlorure traversent la membrane cellulaire à la même vitesse, ou presque, que les ions sodium. Ainsi, lorsque les canaux chlorure sont ouverts, même si un neurone reçoit l'ordre de s'activer, le potentiel d'action est stoppé net.

Le GABA n'est cependant pas un inhibiteur total. Les canaux chlorure ne compensent pas entièrement l'effet des canaux sodium, de sorte qu'un stimulus puissant peut surmonter l'effet inhibiteur.

produire de l'énergie à partir des aliments ou des réserves de graisse. Les scientifiques ont découvert que la consommation d'oxygène par des blattes ayant été piquées est beaucoup plus faible que celle de leurs congénères en bonne santé. Ils pensaient initialement que ce métabolisme réduit était la conséquence de la faible mobilité des victimes. Toutefois, ils ont constaté que quand on provoque une paralysie de la blatte à l'aide de substances chimiques ou en sectionnant des neurones, l'insecte vit moins longtemps qu'une blatte envenimée par la guêpe émeraude.

La clé de cette survie prolongée semble être l'hydratation. On ne sait pas exactement comment le venin agit pour que la blatte garde son eau et reste hydratée, mais il agit en sorte que quand la larve de guêpe éclôt de son œuf, son repas soit prêt à être consommé. Cette larve commence par sucer l'hémolymph de l'insecte puis, quelques jours après, s'introduit dans l'abdomen pour le dévorer, avant de se métamorphoser en poupe. Environ un mois après, une nouvelle guêpe émerge du terrier, laissant derrière elle la carcasse de la blatte.

Le venin de la guêpe émeraude n'est qu'un exemple, poussé à l'extrême, de venin neurotoxique. On connaît plus de 30 espèces dans le genre auquel appartient la guêpe *Ampulex compressa*. Le genre *Ampulex* lui-même appartient à un groupe très vaste et très divers de guêpes, qui compte des dizaines de milliers d'espèces et peut-être des centaines de milliers ou plus, selon certains spécialistes), connues pour l'effet manipulateur de leur venin. Toutes ont un cycle de vie macabre : au stade adulte, elles se nourrissent comme les autres guêpes et abeilles, mais au stade larvaire, elles se nourrissent d'autres animaux. Elles ne sont ni tout à fait indépendantes ni tout à fait parasites – ce sont des « parasitoïdes ».

In grand nombre d'espèces manipulatrices

Les blattes ne sont pas leurs seules cibles ; il existe des guêpes parasitoïdes qui déposent leurs œufs sur ou dans des araignées, des chenilles, des fourmis.

La guêpe *Agriotypus*, qui vit dans l'hémisphère Nord tempéré, plonge sous l'eau pour fixer ses œufs sur des larves de phryganes (ou trichoptères, des insectes ressemblant à des papillons de nuit) et peut

rester immergée jusqu'à une quinzaine de minutes pour accomplir sa tâche.

Les guêpes *Lasiochalcidia* d'Europe et d'Afrique se jettent courageusement dans les mandibules cauchemardesques d'un fourmilion, les écartent et déposent leurs œufs dans sa gorge.

Il existe même des guêpes dites hyperparasitoïdes qui parasitent d'autres guêpes semblables à elles, à l'instar des espèces euro-asiatiques du genre *Lusibia* : celles-ci

Il existe des guêpes dites hyperparasitoïdes qui parasitent d'autres guêpes parasitoïdes

détectent des chenilles parasitées par des guêpes parasitoïdes du genre *Cotesia* et déposent leurs œufs dans des larves de guêpe qui viennent juste de se métamorphoser en pupes. Dans certains cas, de multiples espèces de guêpes se parasitent l'une l'autre, conduisant à une poupée russe d'interactions parasites.

Et pour assurer la sécurité de leur passage de l'état larvaire à l'âge adulte, ces guêpes obtiennent de leur hôte souvent davantage qu'un simple repas. Ainsi, une espèce transforme ses chenilles-hôtes en gardes du corps morts-vivants qui vont défendre de jeunes guêpes métamorphosées en pupes et venant de se nourrir de leur corps. Une larve d'une autre espèce force son araignée-hôte à tisser une toile qui protégera son cocon, juste avant de tuer l'arachnide.

Tandis que les guêpes de cette famille peu ordinaire ont poussé à la perfection l'art du contrôle cérébral, il existe d'autres animaux venimeux dont les toxines modifient les états mentaux. Il existe même des espèces dont les composés neurotoxiques traversent notre propre barrière hématoencéphalique, un exploit qu'aucun venin de guêpe n'accomplit. Mais contrairement aux blattes, nous autres *Homo sapiens* avons une étrange affinité pour les substances qui perturbent notre cerveau. Alors que les blattes fuient celles qui cherchent à leur lécher le cerveau, certaines personnes sont disposées à payer plusieurs centaines d'euros pour une dose de produit qui leur fera connaître une expérience similaire. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Kaiser et F. Libersat, The role of cerebral ganglia in the venom-induced behavioral manipulation of cockroaches stung in the parasitoid jewel wasp, *Journal of Experimental Biology*, vol. 218(7), pp. 1022-1027, 2015.

F. Libersat et R. Gal, What can parasitoid wasps teach us about decision-making in insects, *Journal of Experimental Biology*, vol. 216, pp. 47-55, 2013.

F. Thomas et F. Libersat, Les parasites manipulateurs, *Pour la Science*, n° 391, pp. 36-42, mai 2010.

R. Gal et F. Libersat, A wasp manipulates neuronal activity in the sub-esophageal ganglion to decrease the drive for walking in its cockroach prey, *PLoS One*, vol. 5(4), article e10019, 2010.

Les



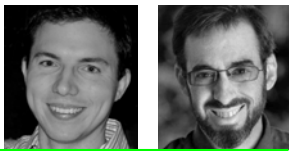
g é a n t s

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 ?

LES AUTEURS



Daniel T. KSEPKA est paléontologue et conservateur au muséum Bruce le Greenwich, dans le Connecticut aux États-Unis.

Michael HABIB, anatomiste à l'université de Californie du Sud, étudie la biomécanique de l'animaux éteints.

L'ESSENTIEL

Pelagornis, un genre

d'oiseaux marins qui a régné sur les océans pendant 50 millions d'années, était connu depuis 150 ans.

Certains pélagornithidés

avaient une envergure double de celle des plus grands oiseaux actuels.

L'étude de Pelagornis

sandersi, le plus grand oiseau fossile connu, donne enfin des clés sur l'envol, le vol et le mode de vie de ces géants des airs.

Les raisons de leur

disparition, il y a trois millions d'années, restent inconnues.

La pittoresque rade de Charleston, en Caroline du Sud, héberge une grande variété d'oiseaux résidents ou de passage, du pélican au cormoran en passant par les goélands, les hérons et de nombreux passereaux. Mais il y a environ 25 millions d'années, des oiseaux géants régnaient dans le ciel de ce port naturel. En 1983, lors de la construction d'un nouveau terminal de l'aéroport local, une équipe de paléontologues dirigée par Albert Sanders, alors conservateur du musée de la ville, a en effet mis au jour le fossile d'un grand oiseau. Malheureusement, comme ces chercheurs ont été confrontés en même temps à de nombreux fossiles, les restes en question se sont retrouvés délaissés sur des étagères. Jusqu'à ce que, récemment, l'un de nous, Daniel Ksepka, décide de réétudier ce fossile et mette en évidence ce qu'il a d'extraordinaire : ce sont les restes du plus grand oiseau volant jamais identifié !

Avec son envergure considérable, il ressemble à un petit avion, et le fait qu'il ait été découvert sur un aéroport est savoureux. En l'honneur de son découvreur, Daniel Ksepka a nommé son espèce *Pelagornis sandersi*, c'est-à-dire littéralement l'« oiseau pélagique de Sanders ».

Daniel Ksepka a ensuite mené des recherches afin de comprendre comment pouvait voler cet oiseau, dont les dimensions dépassent largement celles que certains spécialistes jugeaient maximales pour un oiseau capable de prendre les airs. De son côté, Michael Habib a étudié d'autres oiseaux géants fossiles. L'ensemble de ces travaux a conduit à une description bien plus complète des pélagornithidés, la famille à laquelle appartient *P. sandersi*. En particulier, on peut désormais conjecturer quels styles de vol ces oiseaux pratiquaient vraisemblablement.

Les pélagornithidés ont fait leur entrée dans le registre fossile dès 1857, quand Édouard Lartet en décrit un humérus. Ce père de la science préhistorique française pensait avoir identifié un os appartenant à un très ancien albatros et nomma l'espèce correspondante *Pelagornis miocaenus*, soit « oiseau de haute mer du Miocène ». Ce nom peu inspiré n'enlève rien au caractère spectaculaire du fossile, puisque l'humérus en question mesure près de 60 centimètres de long. Cela signifie que son propriétaire avait une envergure au moins double de celle d'un grand albatros d'aujourd'hui

(en moyenne 3,1 mètres). À l'époque de Lartet, une telle envergure était inconcevable. Malheureusement sur la base de cet unique humérus, les paléontologues du XIX^e siècle n'étaient pas en mesure de déterminer à quoi cet oiseau avait bien pu ressembler.

Un oiseau hauturier

Toutefois, l'idée que l'humérus décrit par Lartet pouvait provenir d'une autre espèce que celle d'un grand albatros s'imposa une dizaine d'années plus tard, en 1873, quand Richard Owen décrit le crâne d'un autre oiseau géant, trouvé en Angleterre. Ses recherches montrèrent clairement que l'espèce dont provenait ce crâne – qu'il nomma *Odontopteryx toliapica* – ne pouvait appartenir à aucun des groupes d'oiseaux modernes. Et la découverte ultérieure de spécimens plus complets révéla que l'oiseau dont Lartet avait étudié un humérus appartenait au même groupe éteint défini par le crâne d'Owen : celui des pélagornithidés.

D'autres découvertes ont été réalisées au cours du siècle suivant. En 1910, un marin brésilien vendit un crâne de pélagornithidé à l'université de Königsberg, en Allemagne (aujourd'hui Kaliningrad, en Russie). On l'attribua à une nouvelle espèce : *Pseudodontornis longirostris*. Puis sa trace se perdit au cours des bombardements alliés sur la ville en 1945. On ignore si ce spécimen a été volé, détruit ou transporté ailleurs.

Au cours des décennies suivantes, les chasseurs de fossiles ont mis au jour plusieurs nouvelles espèces, dont *Pelagornis porri*, en Californie, et *Pelagornis chilensis*, au Chili. Si les premiers fossiles du genre *Pelagornis* étaient en piteux état, les nouveaux, même partiels, ont permis aux paléontologues de mieux comprendre l'anatomie des pélagornithidés et leur adaptation au vol.

L'image qui émergea alors défie l'imagination, tant les traits des pélagornithidés sont stupéfiants. Il en est ainsi de ces curieux rangs serrés de « dents » portés par les mâchoires inférieures et supérieures. Nous savons que les oiseaux ont perdu la faculté de former des dents il y a plus de 55 millions d'années, donc une dizaine de millions d'années avant l'émergence des pélagornithidés. En réalité, ces derniers ont développé une alternative aux véritables dents dont étaient pourvus leurs ancêtres dinosaures : leurs « dents » ne sont que des excroissances osseuses.



LE CRANE DE *PELAGORNIS SANDERSI* est montré ci-dessus vu sous différents angles. On voit distinctement les pseudodents, des excroissances osseuses qui constituent l'un des traits caractéristiques des oiseaux du genre *Pelagornis*. Ces prédateurs marins utilisaient sans doute leurs pseudodents pour saisir des proies et les maintenir dans leur bec.

De vraies dents sont enchâssées dans la mâchoire et faites d'émail et de dentine. Les pseudodents des pélagornithidés n'ont rien de cela : ce sont des structures creuses formées directement dans l'os, curieusement groupées en sous-ensembles de trois, eux-mêmes groupés par trois. Des grandes pseudodents coniques sont en effet précédées et suivies de sous-ensembles comprenant une excroissance de taille moyenne flanquée d'aiguilles acérées (voir l'illustration ci-dessus). Du vivant des pélagornithidés, ces pseudodents étaient probablement recouvertes d'une mince couche du même matériau que celui qui gaine le bec des oiseaux actuels. On imagine qu'en ouvrant leur bec débordant de pseudodents acérées, les pélagornithidés nous auraient semblé menaçants. À quoi servaient ces excroissances ? Sans doute à saisir des proies et à les maintenir fermement.

Les performances prédatrices des pélagornithidés sont soulignées par d'autres traits étranges. Ainsi, le dispositif crânien de ces oiseaux était d'une souplesse incomparable : une forte charnière se trouvait là où la boîte crânienne rencontre la partie supérieure du bec et permettait à cette

dernière de ployer si nécessaire. Ensuite, la partie inférieure du bec comportait des articulations sur chacun de ses côtés qui lui permettaient aussi de ployer ; enfin, au lieu d'être jointe au menton par de l'os, cette « mâchoire inférieure » l'était par un tendon élastique. En somme, il semble que les pélagornithidés aient acquis un bec denté adapté à la saisie de grosses proies.

Un géant fragile ?

Pelagornis se distingue aussi des autres genres d'oiseaux par les os subcrâniens. Les os alaires sont tellement aplatis que cela a conduit certains paléontologues à les placer à l'envers lors de la reconstruction de squelettes ! Tous les oiseaux qui volent ont des os creux qui les allègent, mais *Pelagornis* a poussé cette caractéristique à l'extrême.

Chaque élément de ses ailes est constitué de parois osseuses exceptionnellement minces. La rigidité des os est donc assurée grâce à une structure pesant très peu, ce qui est primordial chez un grand oiseau volant. Des os fins ont cependant l'inconvénient majeur de se fracturer facilement, ce

qui peut condamner un oiseau à rester au sol et donc à ne plus pouvoir se nourrir...

Les os des membres postérieurs sont sans aucun doute les parties les plus normales des pélagornithidés, du moins en termes de forme. Les pattes qu'ils formaient semblent ridicules tant elles sont petites en comparaison des ailes. Néanmoins, leurs parois renforcées et leur forme massive devaient les rendre particulièrement résistantes. Les pélagornithidés devaient marcher maladroitement, comme de nombreux oiseaux marins actuels, mais l'essentiel était qu'ils puissent courir brièvement afin de parvenir à s'envoler.

Les chercheurs n'ont pas attendu la description de *P. sandersi*, publiée en 2014, pour savoir que la morphologie des pélagornithidés est inhabituelle, mais cette description a renforcé encore cette impression d'étrangeté. L'humérus de l'oiseau mesurait en effet presque un mètre de long, de sorte qu'il dépassait de plus de 30 % la longueur de celui de Lartet.

Cette longueur, supérieure à celle du bras d'une personne de taille moyenne, est si grande qu'il semblait impossible que cet humérus ait pu appartenir à un oiseau. On considérerait en effet que l'envergure maximale théorique de l'aile d'un oiseau était de 5,1 mètres : au-delà, estimait-on, un oiseau est trop lourd pour se maintenir en l'air en battant des ailes. Mais il fallut bien se rendre à la réalité : les os découverts à Charleston sont clairement ceux d'une aile taillée pour le vol et d'une patte pour l'envol... Et puisqu'un crâne doté d'une mâchoire à pseudodents les accompagnait, aucun doute n'est possible : il s'agit bien des restes d'un pélagornithidé.

L'excellent état de conservation de ces éléments de squelette, associé aux connaissances accumulées grâce à d'autres spécimens de pélagornithidés, a rendu possible une restitution de *P. sandersi*. Il apparaît que lorsque cet oiseau géant déployait ses ailes, elles mesuraient 6,06 à 7,38 mètres de bout en bout (voir les figures pages 58 et 61), soit plus du double de l'envergure du grand albatros, le plus grand des oiseaux actuels (avec le condor). Puisqu'elles supportaient le poids du corps de l'oiseau, les pattes, ou plutôt la circonférence de leurs os, indiquent que *P. sandersi* aurait pesé entre 21,9 et 40,1 kilogrammes. Quoique massif en comparaison des oiseaux modernes, l'animal était fin pour son envergure, grâce à un corps petit et à un squelette ultraléger.

Des os de *P. sandersi*, découverts dans les années 1980 près de l'aéroport de Charleston, aux États-Unis, viennent d'être réétudiés. Ils révèlent comment cet oiseau fossile – le plus grand connu à ce jour – pouvait voler. La question passionne les paléontologues, car l'envergure de cet oiseau, à peu près double de celle d'un grand albatros, semblait dépasser de beaucoup le maximum possible pour voler, compte tenu des lois de l'aérodynamique. Toutefois, plusieurs caractéristiques clés permettaient à *P. sandersi* de voler (ci-contre), ce que les chercheurs ont compris en comparant les mensurations de l'oiseau fossile avec celles d'oiseaux actuels (ci-dessous).

D'ETROITES EPAULES

L'omoplate de *P. sandersi* est très petite comparée au reste du corps, ce qui suggère que les muscles servant à battre des ailes se sont rapetissés à mesure que les ancêtres de cet oiseau ont abandonné ce style de vol. En outre, la forme presque carrée de la tête de l'humérus gênait la rotation nécessaire aux battements dans l'articulation de l'épaule, mais aidait à bloquer l'aile en vol plané.

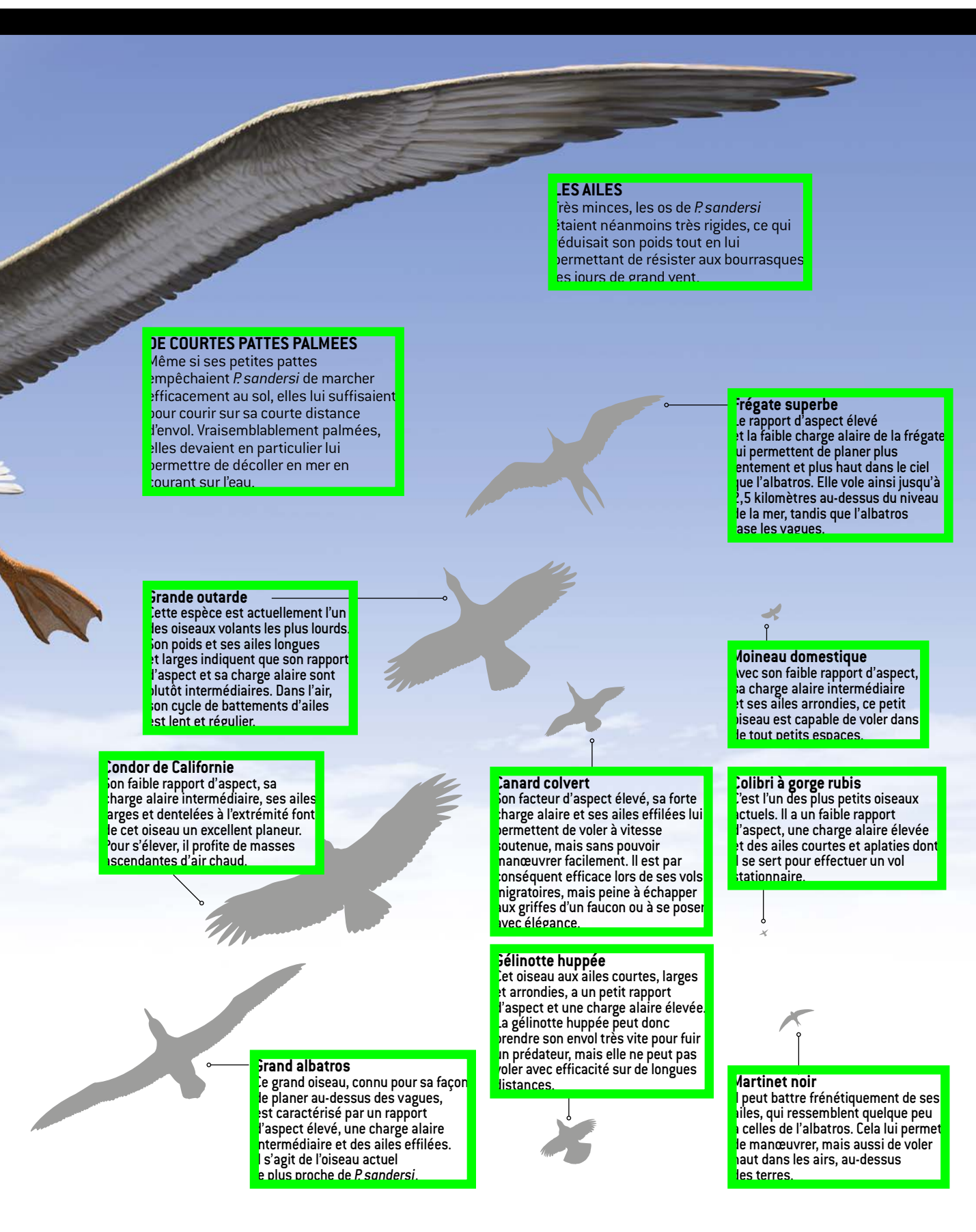
LONGUES ET EFFILÉES

Parmi les facteurs déterminant le style de vol chez les oiseaux figurent le rapport d'aspect (rapport entre la longueur de l'aile et sa largeur), la charge alaire (le poids du corps par unité de surface d'aile) et la forme de l'aile. *P. sandersi* présentait un rapport d'aspect élevé, des ailes effilées et une charge alaire intermédiaire, comme un albatros. Cela suggère que ce géant éteint excellait dans le vol plané sur de longues distances au-dessus des océans.

P. sandersi

Argentavis

Cette espèce éteinte passait jadis pour le plus grand oiseau volant ayant vécu. Il semble que ses ailes étaient similaires à celles d'un condor, avec un faible rapport d'aspect et des plumes écartées aux extrémités des ailes.



LES AILES

Très minces, les os de *P. sandersi* étaient néanmoins très rigides, ce qui réduisait son poids tout en lui permettant de résister aux bourrasques les jours de grand vent.

DE COURTES PATTES PALMEES

Même si ses petites pattes empêchaient *P. sandersi* de marcher efficacement au sol, elles lui suffisaient pour courir sur sa courte distance d'envol. Vraisemblablement palmées, elles devaient en particulier lui permettre de décoller en mer en courant sur l'eau.

Frigate superbe

Avec son rapport d'aspect élevé et la faible charge alaire de la frigate, elle permet de planer plus haut et plus longtemps que l'albatros. Elle vole ainsi jusqu'à 2,5 kilomètres au-dessus du niveau de la mer, tandis que l'albatros se pose sur les vagues.

Grand outarde

Cette espèce est actuellement l'un des oiseaux volants les plus lourds. Son poids et ses ailes longues et larges indiquent que son rapport d'aspect et sa charge alaire sont plutôt intermédiaires. Dans l'air, son cycle de battements d'ailes est lent et régulier.

Moineau domestique

Avec son faible rapport d'aspect, sa charge alaire intermédiaire et ses ailes arrondies, ce petit oiseau est capable de voler dans les tout petits espaces.

Condor de Californie

Avec son faible rapport d'aspect, sa charge alaire intermédiaire, ses ailes larges et dentelées à l'extrémité font de cet oiseau un excellent planeur. Pour s'élever, il profite de masses ascendantes d'air chaud.

Canard colvert

Avec son facteur d'aspect élevé, sa forte charge alaire et ses ailes effilées lui permettent de voler à vitesse soutenue, mais sans pouvoir manœuvrer facilement. Il est par conséquent efficace lors de ses vols migratoires, mais peine à échapper aux griffes d'un faucon ou à se poser avec élégance.

Colibri à gorge rubis

C'est l'un des plus petits oiseaux actuels. Il a un faible rapport d'aspect, une charge alaire élevée et des ailes courtes et aplaties dont il se sert pour effectuer un vol stationnaire.

Hélinotte huppée

Cet oiseau aux ailes courtes, larges et arrondies, a un petit rapport d'aspect et une charge alaire élevée. La hélinotte huppée peut donc prendre son envol très vite pour fuir un prédateur, mais elle ne peut pas voler avec efficacité sur de longues distances.

Martinet noir

Il peut battre frénétiquement de ses ailes, qui ressemblent quelque peu à celles de l'albatros. Cela lui permet de manœuvrer, mais aussi de voler haut dans les airs, au-dessus des terres.

Grand albatros

Ce grand oiseau, connu pour sa façon de planer au-dessus des vagues, est caractérisé par un rapport d'aspect élevé, une charge alaire intermédiaire et des ailes effilées. Il s'agit de l'oiseau actuel le plus proche de *P. sandersi*.

La mesure de ces paramètres nous a ouvert la voie à une évaluation, par le calcul, du vol de *P. sandersi* et d'autres pélagornithidés. Remonter aux capacités locomotrices d'une espèce éteinte est un exercice particulièrement difficile, mais nous disposons aujourd'hui de simulateurs performants de l'aérodynamique d'un objet volant. Nous y avons fait appel pour étudier le vol de notre incroyable géant.

Toutefois, afin de bien saisir ce que prédisent ces programmes, encore faut-il étudier les différents styles de vol pratiqués par les oiseaux actuels. Très variables, ils vont du surplacé du colibri aux lents battements d'ailes du goéland. À l'évidence, ils varient surtout en fonction du rapport d'aspect de leurs ailes, c'est-à-dire du rapport entre leur longueur et leur largeur.

D'emblée, les ailes étonnamment

longues de *P. sandersi* et des pélagornithidés – donc leur rapport d'aspect très élevé – ont suggéré que leur principale façon de voler consistait à surfer sur le vent ou les courants ascendants. Toutefois, les oiseaux planeurs d'aujourd'hui ont diverses façons de se maintenir en l'air pendant de longues périodes, de sorte qu'un examen plus approfondi de ces types de vol s'imposait.

Le condor ou le vautour ont des

ailes très larges par rapport au poids de leur corps. En comparaison avec un oiseau de même masse, mais aux ailes moins portantes, cela implique des forces par unité de surface relativement faibles sur les ailes : on parle de faible « charge alaire ». Les ailes de ces grands oiseaux ont aussi la particularité d'être dentelées, c'est-à-dire que les rémiges qui les terminent peuvent s'écarter pour réduire la traînée (la résistance à l'écoulement de l'air). La combinaison de leur faible charge alaire et de la dentelure de leurs ailes rend le condor et le vautour capables de se laisser porter sur les courants d'air chaud qui s'élèvent du sol. Ils réussissent cela avec des ailes plus courtes que celles des grands planeurs marins, ce qui peut se révéler précieux dans les environnements terrestres souvent truffés d'obstacles (terrains accidentés, forêts, etc.).

La frégate, pour sa part, est un oiseau marin dont l'envergure atteint 2,3 mètres. Elle pratique un tout autre style de vol.

Puisqu'elle profite des courants d'air chaud qui se forment au-dessus des océans. Plutôt que dentelées, ses ailes sont fuselées et effilées. Comptant parmi les oiseaux les plus légers, elle est logiquement caractérisée par une charge alaire exceptionnellement basse. Ces caractéristiques lui permettent de voler sur de longues distances et très haut dans le ciel, toujours prête à fondre sur une proie repérée à la surface de l'eau ou à faible profondeur.

À l'autre extrême du spectre des vols des oiseaux planeurs se trouve le grand albatros. Au contraire de la frégate, cet

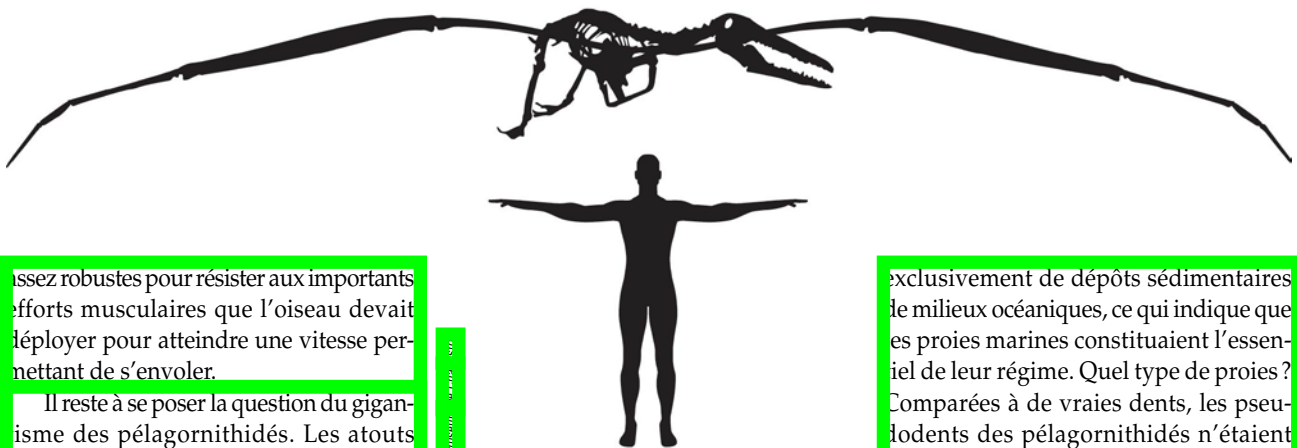
oiseau effectue avec une position fixe, les albatros effectuent avec très peu d'énergie de longs déplacements. En 2004, des écologues ont étudié ceux d'un albatros équipé d'une balise et ont établi que, pendant neuf heures consécutives, l'oiseau a maintenu une vitesse moyenne de 127 kilomètres par heure ! Ce record de vitesse, pour un animal en vol plané dynamique, lui a été possible grâce aux vents d'une tempête de l'Antarctique.

Cependant, l'étude de *P. sandersi* suggère que les pélagornithidés pratiquaient un style de vol plané inexistant chez les grands oiseaux planeurs d'aujourd'hui. Avec leurs ailes étroites, mais de grande surface de par leur très grande longueur, ils auraient en quelque sorte combiné les deux meilleurs styles : celui du vol ascensionnel dans les courants d'air de la frégate et celui du vol plané dynamique de l'albatros. Leur envergure leur aurait permis de pratiquer le vol plané dynamique quand le vent était assez fort et, grâce à la grande superficie de leurs ailes, de planer sur des milliers de kilomètres dans les courants ascensionnels s'élevant de l'océan.

Les plus gros pélagornithidés couvraient sans doute de telles distances assez vite. Selon nos calculs, leur vitesse de vol optimale dépassait 40 kilomètres par heure, ce qui est considérable. En outre, il semble que *P. sandersi* maintenait ce rythme sans grand effort : après avoir atteint 15 mètres d'altitude, il pouvait planer sur plus d'un kilomètre sans battre des ailes et sans l'assistance du vent.

P. sandersi passait probablement la majeure partie de son temps dans les airs, mais il fallait bien qu'il se pose de temps en temps – ne serait-ce que pour nicher – et donc qu'il redécollât. Comment faisait-il étant donné ses pattes minuscules ? La découverte de squelettes assez complets a montré que le corps des pélagornithidés était compact, de sorte que leurs pattes semblent finalement bien proportionnées. En réalisant la première restitution quantitative du mécanisme de l'envol des pélagornithidés géants, Michael Habib a prouvé que leurs petites pattes trapues, et probablement palmées, suffisaient à sprinter brièvement, notamment à la surface de l'eau. Les os de ces pattes étaient





assez robustes pour résister aux importants efforts musculaires que l'oiseau devait déployer pour atteindre une vitesse permettant de s'envoler.

Il reste à se poser la question du gigantisme des pélagornithidés. Les atouts d'une grande taille sont considérables : par kilomètre parcouru, les grands oiseaux consomment moins d'énergie que les petits ; ils peuvent capturer (ou dérober) de plus grandes proies et sont aussi moins souvent la cible de prédateurs. Qui attaquera un oiseau géant, une fois que celui-ci a pris son envol ? Mais une grande taille n'est pas toujours avantageuse : les gros animaux doivent se nourrir davantage, de sorte que leurs populations ne peuvent qu'être moins nombreuses que celles des animaux de taille plus modeste. Malgré cet inconvénient, de nombreuses lignées d'animaux volants de grande taille ont prospéré. L'absence actuelle de très grands oiseaux n'est qu'une exception à la règle : les animaux volants de grande taille ont presque toujours sillonné le ciel au cours des derniers 120 millions d'années.

Héritier des ptérosaures

De fait, les ptérosaures, des reptiles volants, ont régné dans les airs au-dessus des terres comme des mers pendant des millions d'années. Ceux qui survolaient les océans se nourrissaient probablement d'invertébrés et de poissons. Leur corps était aussi bien adapté aux vols sur de longues distances, et rien n'annonçait leur disparition quand, il y a 65 millions d'années, un gros astéroïde a percuté la Terre et entraîné leur extinction. Devenues vacantes, les niches écologiques des ptérosaures ont alors pu être occupées par de grands oiseaux, notamment marins.

Quelque dix millions d'années après la chute de l'astéroïde, l'évolution a fait apparaître les pélagornithidés, qui ont occupé les niches des ptérosaures marins. Leurs fossiles proviennent en effet

LORSQUE SES AILES ÉTAIENT DÉPLOYÉES, *Pelagornis sandersi* avait une envergure comprise entre 6 et 7,4 mètres. Elle est comparée ici à l'« envergure » de 1,75 mètre atteinte par un homme haut de 1,80 mètre.

BIBLIOGRAPHIE

D. T. Ksepka, Flight performance of the largest volant bird, *PNAS*, vol. 111 [29], pp. 10624-10629, 2014.

M. Habib, Constraining the air giants : Limits on size in flying animals as an example of constraint-based biomechanical theories of form, *Biological Theory*, vol. 8 [3], pp. 245-252, 2013.

P. Catry et al., Sustained fast travel by a grey-headed albatross [*Thalassarche chrysostoma*] riding an Antarctic storm, *The Auk*, vol. 121 [4], pp. 1208-1213, 2004.

exclusivement de dépôts sédimentaires de milieux océaniques, ce qui indique que les proies marines constituaient l'essentiel de leur régime. Quel type de proies ? Comparées à de vraies dents, les pseudodents des pélagornithidés n'étaient guère solides ; on peut donc supposer qu'ils se nourrissaient d'animaux à corps mous présents à la surface de l'océan : calmars, anguilles...

Les pélagornithidés volaient aussi sans doute la pitance d'autres oiseaux. Aujourd'hui, certains grands oiseaux marins – le grand labbe par exemple – brutalisent en vol des oiseaux plus petits qu'eux pour leur faire régurgiter leurs proies, qu'ils gobent ensuite. Comme les pélagornithidés étaient les plus grands oiseaux de leurs écosystèmes, nul doute qu'ils avaient cette possibilité. Peut-être se nourrissaient-ils aussi des oisillons d'autres espèces, à l'instar du grand labbe et même de certains pélicans.

Le genre *Pelargonis* n'a pas été le seul à occuper la niche des grands ptérosaures marins : un autre groupe de très grands oiseaux, celui des tératornes, est apparu il y a quelque 23 millions d'années, et a perduré jusqu'à la fin du Pléistocène, il y a 11 700 ans. Munis d'ailes plus larges et plus courtes (seulement 4 mètres d'envergure) que celles des pélagornithidés et dotés d'un corps plus massif, il est probable que ces oiseaux volaient et chassaient comme nos condors actuels.

Après 50 millions d'années de survol des mers, le genre *Pelargonis* a disparu il y a trois millions d'années. On ignore pourquoi, même si l'on sait qu'avec la formation de l'isthme de Panama notamment, les milieux océaniques subissaient alors de profonds changements. Ces derniers ont-ils privé, directement ou indirectement, les pélagornithidés de leurs ressources ? Il est difficile de l'admettre, sachant que cette famille d'oiseaux avait, au fil des millions d'années précédents, traversé de nombreux autres bouleversements. ■

Une boussole dans les cellules

Paul Adler et Jeremu 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 voisines.

L'ESSENTIEL

Chez les animaux,

les cellules des tissus sont toutes orientées de la même façon.

Des biologistes ont

identifié des protéines clés permettant aux cellules de détecter l'avant et l'arrière de l'animal.

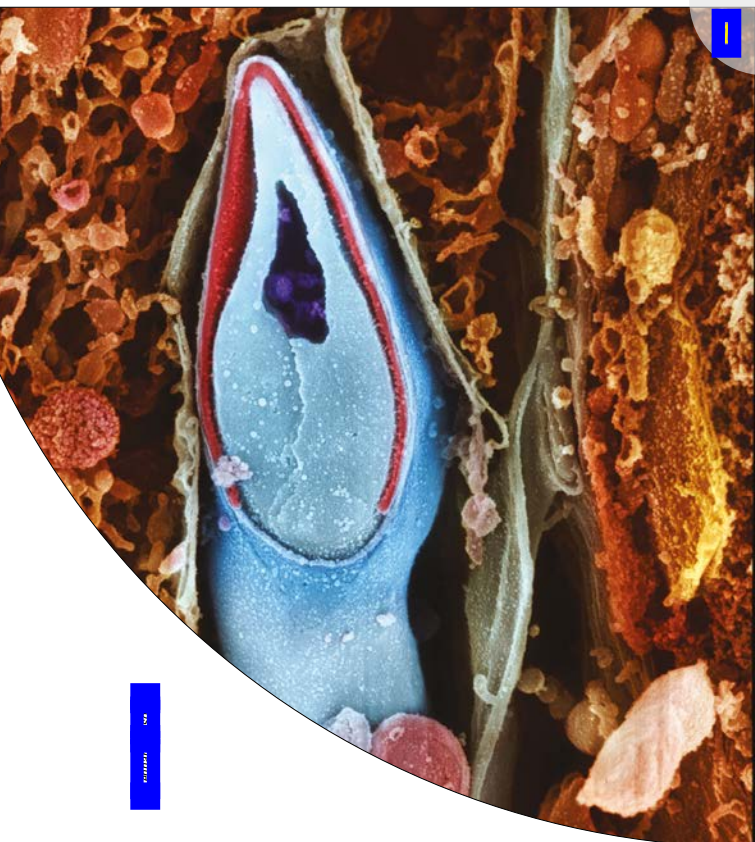
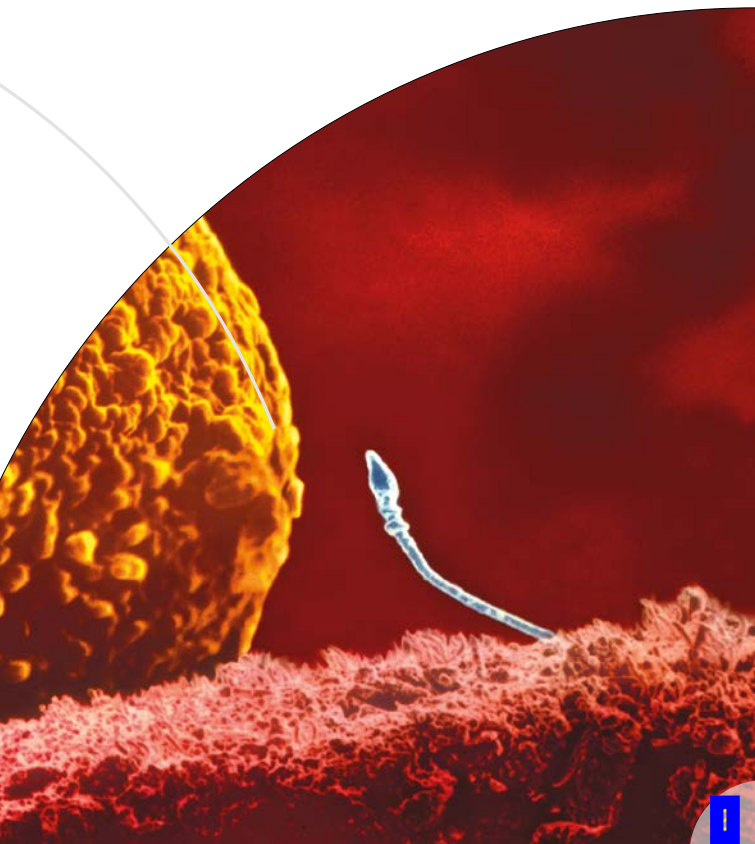
Ces protéines sont

si essentielles que les gènes qui les codent n'ont pas beaucoup changé depuis le moment où ils ont commencé à évoluer, il y a plus d'un demi-milliard d'années.

Construire un corps n'est pas simple. Poissons, grenouilles et humains sont tous au départ une cellule unique qui se transforme, malgré de nombreux obstacles, en un organisme profondément organisé et d'une grande complexité.

L'œuf fécondé se divise en deux cellules qui se dédoublent à leur tour et ainsi de suite. Au bout de quelques semaines, elles sont des dizaines de milliers. À ce moment-là, la petite boule qu'elles formaient initialement s'est allongée. Une extrémité est arrondie en forme de bulbe, tandis qu'un sillon peu profond parcourt l'autre extrémité, plus fine. Puis un étonnant ballet commence. Le sillon se creuse et les cellules qui constituent sa paroi s'inclinent peu à peu jusqu'à se toucher et adhérer les unes aux autres pour former un long tube creux – le tube neural – qui donnera naissance d'un côté au cerveau, au niveau du renflement, et de l'autre à la colonne vertébrale.

Pour que ces cellules et d'autres au sein de l'embryon s'assemblent avec autant de précision, il doit exister un mécanisme qui leur permette de percevoir où elles se situent à l'échelle de l'organisme. Chaque cellule doit « savoir » où sont l'avant, l'arrière, le haut et le bas de l'animal, ainsi que la direction qui la rapproche ou l'éloigne le plus du reste de l'organisme. Ces dix dernières années, avec d'autres biologistes du développement, nous avons essayé de comprendre comment ce système d'orientation des cellules fonctionne. Nous avons ainsi découvert un composant clé, constitué de plusieurs protéines qui fonctionnent ensemble comme une boussole miniature à l'intérieur de chaque cellule. Sans cette



LES STADES PRECOCES DU DEVELOPPEMENT HUMAIN sont en partie contrôlés par la polarité des cellules. Peu après la fécondation (*ici, la photo 1 montre un spermatozoïde encore dans les testicules, la photo 2 un autre approchant un ovocyte, vus au microscope électronique à balayage*), l'embryon s'allonge. Au bout de vingt-deux jours, les cellules de la crête neurale (*en jaune sur l'image 3*) se rejoignent pour former le tube qui donnera le cerveau et la colonne vertébrale, bien visible à six semaines (*photo 4*). Si la polarité des cellules est perturbée, le tube se referme mal.



boussole, le cœur, les poumons, la peau et d'autres organes ne se développeraient pas convenablement. Quand une de ces protéines est altérée chez l'homme, de graves anomalies congénitales s'ensuivent.

Bien qu'il reste encore beaucoup à comprendre sur le fonctionnement de ce système d'orientation, nos découvertes éclairent d'un jour nouveau les processus fondamentaux du développement au sein du règne animal. C'est dans les cellules épithéliales que nous comprenons le mieux comment cette boussole fonctionne. Celles-ci tapissent la surface des tissus, un peu comme les pavés d'un trottoir, formant des couches de l'épaisseur d'une cellule. Si le drap d'un lit était constitué de cellules épithéliales, les protéines que nous et d'autres avons trouvées permettraient à chacune d'entre elles de sentir lequel des côtés est le plus proche de la tête ou du pied du lit.

Des gènes évoluant depuis plus de

500 millions d'années

Les organismes dont les cellules ont une boussole bénéficient d'un avantage évolutif : leurs tissus n'ont pas besoin d'être symétriques dans toutes les directions. Certaines parties peuvent se spécialiser. Par exemple, dans l'oreille, l'orientation de la touffe ciliaire des cellules auditives – des groupes de minuscules poils qui vibrent à certaines fréquences – est indispensable à l'activation de ces cellules, et les touffes ciliaires sont ainsi toutes orientées de la même façon (voir la figure page 69). Les scientifiques désignent l'asymétrie de ces couches tissulaires sous le nom de polarité planaire, car le tissu peut alors être vu comme une surface comportant deux pôles opposés (l'adjectif « planaire » est ici un néologisme, car en français, ce terme est un nom féminin se référant à des vers plats aquatiques).

Lorsque le vivant invente un outil qui fonctionne, il le garde. À l'instar des gènes codant nombre de protéines régulatrices, ceux qui codent les protéines de polarité planaire sont très similaires chez des espèces pourtant très éloignées d'un point de vue évolutif. Par exemple, les versions que l'on trouve chez les mammifères ressemblent à celles découvertes chez les insectes. La présence

LES AUTEURS



Paul ADLER est professeur de biologie à l'université de Virginie, aux États-Unis.

Jeremy NATHANS est professeur de biologie moléculaire, génétique, neurosciences et ophtalmologie à l'école de médecine de l'université Johns Hopkins, aux États-Unis. Il est aussi chercheur à l'institut médical Howard Hughes.

de ces gènes chez des espèces aussi distantes émoigne de leur ancienneté : ils évoluent depuis plus de 500 millions d'années.

Une grande partie de ce que nous savons de la polarité planaire provient d'études menées sur des insectes à partir du milieu du XX^e siècle. Pour plus de commodité, ces expériences se sont concentrées non pas sur leurs organes internes, mais sur leur squelette externe ou cuticule, plus accessible et présent chez la plupart des insectes adultes.

La cuticule est sécrétée par une couche plus molle de cellules épidermiques située juste en dessous. Au microscope, elle révèle un paysage bien ordonné de crêtes et d'écailles, parsemé de divers poils à intervalles réguliers. Certaines de ces protrusions, nommées sensilles, sont sensibles aux changements de pression ou à des substances chimiques et aident ainsi les insectes à réagir à leur environnement. Le point important est que quasiment chaque sensille est parallèle à ses plus proches voisines, si bien que toutes leurs extrémités ont tendance à pointer dans la même direction. Sur les ailes, les poils sont orientés vers l'extérieur. Sur le corps lui-même, ils pointent à l'opposé de la tête. Comme les parois d'un tube neural en formation, les cellules qui produisent ces poils (chaque poil est issu d'une cellule) semblent distinguer l'avant et l'arrière de l'animal. Elles perçoivent aussi quel côté est plus proche (proximal) ou plus distant (distal) des autres tissus.

Mieux, les cellules partagent ces informations directionnelles avec leurs voisines. C'est ce qu'ont montré Peter Lawrence de l'université de Cambridge, en Angleterre, Michael Locke de l'université de Western

Ontario, au Canada, et d'autres au cours d'une série d'expériences pionnières menées il y a plus de 40 ans. Ces biologistes ont découpé de minuscules carrés de la couche épidermique qui sécrète l'exosquelette chez deux espèces de punaises – des réduves (genre *Rhodnius*) et des punaises de l'asclépiade (genre *Onco-peltus*). Puis ils ont tourné les carrés de 80 degrés et les ont réimplantés dans l'épiderme de l'abdomen de chaque insecte hôte.

On s'attendait à ce que les sensilles à la surface du greffon pointent dans la direction opposée à celle de leurs congénères alentour. Or, à la mue suivante, lorsque les insectes se sont débarrassés de leur ancien exosquelette et en ont synthétisé

es mutations

chacun de ces gènes produisait
une série de volutes évoquant
des coups de pinceau de Van Gogh

Enfin, en nouveau, les chercheurs ont observé un changement saisissant. Au lieu de se dresser dans des directions opposées, les sensilles ont formé de magnifiques volutes qui traversaient les bords du greffon. Le motif suggérait que les cellules voisines avaient ajusté leur orientation pour minimiser leurs différences. Les cellules étaient donc capables de s'informer les unes les autres de la direction vers laquelle pointer leurs poils. Mais comment ?

Pour révéler la machinerie cellulaire et moléculaire sous-jacente, il fallait changer de tactique, passer des manipulations chirurgicales à une approche génétique. Or en génétique, l'insecte le mieux étudié depuis 1910 est la mouche du vinaigre, *Drosophila melanogaster*.

Des poils de mouche en pétard

Dans les années 1980, divers chercheurs, dont l'un d'entre nous (Paul Adler), ont commencé à étudier la polarité planaire des issus de la mouche du vinaigre. En substance, notre approche consistait à identifier et à étudier des drosophiles mutantes dont le système de polarité planaire présentait une anomalie, afin d'en déduire comment il fonctionne. Nous savions par exemple que les poils des ailes de la drosophile, comme ceux de l'abdomen des réduves et des punaises de l'asclépiade, sont orientés dans une même direction, en l'occurrence vers le bord de l'aile le plus éloigné du corps. Or les mouches qui portaient des mutations d'un gène nommé *frizzled* avaient les poils des ailes en pétard. Et des mutations d'un autre gène, nommé *dishevelled* (échevelé), provoquaient le même désordre, signe que ces deux gènes faisaient probablement partie d'un seul et même système contrôlant l'orientation des cellules.

Deux groupes – l'un dirigé par David Gubb et Antonio García-Bellido, alors à l'université autonome de Madrid, et l'autre sous la direction de Paul Adler – ont étudié de manière systématique comment les mutations des gènes *frizzled* et *dishevelled* et d'autres perturbent l'orientation de diverses parties de la cuticule de la mouche du vinaigre. Finalement, avec d'autres chercheurs, nous avons établi que, chez la drosophile, six gènes codent des protéines clés du système de polarité planaire. Deux d'entre eux, isolés par Paul Adler en 1998, conduisaient à des résultats très proches

de ceux du gène *frizzled* : les mutations de chacun de ces gènes produisaient une série de volutes évoquant les coups de pinceaux de Vincent Van Gogh. C'est pourquoi il nomma l'un des gènes *Van Gogh* et l'autre *starry night* (nuit étoilée).

Une nouvelle étape a été franchie quelques années plus tard quand Lily Wong, alors doctorante dans le laboratoire de Paul Adler, a examiné des ailes en cours de développement afin de comprendre comment l'ensemble des poils se forment et comment les mutations des gènes de polarité planaire altèrent ce processus. Lily Wong a découvert que, normalement, chaque cellule épithéliale fabrique un poil sur son bord le plus distal, mais que chez les mouches mutées, le poil ne se forme plus au même endroit de la cellule. Ce résultat a conduit Lily Wong et Paul Adler à formuler l'hypothèse suivante : les protéines de polarité planaire feraient partie d'une voie de signalisation qui régule l'architecture du cytosquelette – un réseau de filaments qui, dans la cellule, contrôle sa forme et son mouvement.

Par ailleurs, Charles Vinson, lui aussi alors doctorant dans le laboratoire de Paul Adler, a montré que les cellules communiquent de proche en proche sur leur

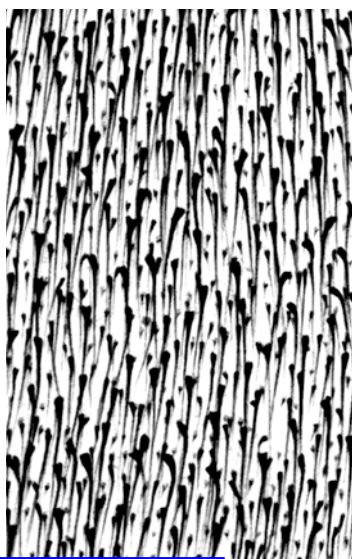
polarité. Au cours du développement d'une mouche normale, Charles Vinson a produit, sur l'aile, de petits îlots de cellules où le gène *frizzled* était muté. Du côté le plus éloigné du corps de la mouche, les cellules mutantes ont amené leurs voisines non mutantes à réorienter leurs poils d'environ 80 degrés, de sorte que ceux-ci pointaient dans la direction de la parcelle mutée. Les cellules non mutantes situées plus loin, en revanche, sont restées inchangées. Selon Charles Vinson et Paul Adler, ce résultat suggère que le système de polarité planaire contrôle l'orientation des cellules *via* des signaux à courte portée et qu'il n'a pas besoin d'un signal précis distribué sur de longues distances – un gradient chimique, par exemple – pour déterminer la bonne orientation des poils.

L'idée que des protéines de polarité planaire puissent réguler la formation du cytosquelette a conduit plusieurs biologistes à examiner comment ces protéines sont réparties dans la cellule. Il s'est révélé que leur distribution n'est pas uniforme et qu'elles peuvent donc perturber les différents côtés de la cellule de diverses façons. En 2005 en effet, Tadashi Uemura, de l'université de Kyoto, au Japon, Jeffrey Axelrod, de l'université Stanford, aux États-Unis,



CHEZ UN EMBRYON HUMAIN DE 22 JOURS
apparaissent déjà, de chaque côté de la gouttière neurale, les bourrelets qui donneront naissance au muscle squelettique et aux os, comme le montre cette reconstitution par ordinateur. Grâce à leur boussole interne, les cellules de chaque bourrelet « savent » où elles se situent par rapport au corps et comment sont orientées leurs voisines.

Les peaux des poissons, des oiseaux et des mammifères ont un point commun. Qu'elle soit couverte d'écailles, de plumes ou de poils, la couche la plus externe de leur corps est organisée selon certains motifs réguliers qui, entre autres, garantissent aux animaux une meilleure protection contre les éléments extérieurs. Ces motifs ne sont pas le fruit du hasard. Des biologistes ont isolé six familles de gènes dits de polarité, qui aident les cellules à percevoir les directions et à s'orienter selon des schémas spécifiques. Par exemple, les poils de la souris poussent parallèlement les uns aux autres (*ci-contre, à gauche*). Mais lorsque *Frizzled6*, l'un des gènes directionnels, est altéré, les poils poussent en dessinant des volutes (*ci-contre, à droite*).



Tel que de souris normal

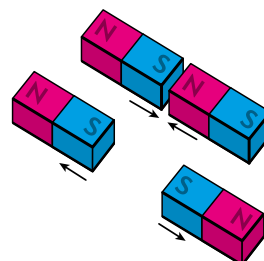


Tel que de souris mutant

Comme des aimants

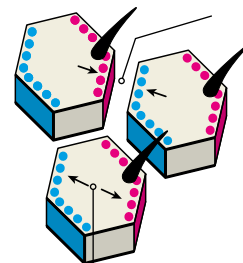
Pour expliquer comment les cellules détectent la direction dans des tissus complexes, les auteurs proposent de s'inspirer du fonctionnement des aimants. Les aimants s'alignent de façon que les pôles opposés (*ci-contre, à gauche, en bleu et en rose*) s'attirent et les pôles identiques se repoussent. Un mécanisme similaire intervient peut-être dans les cellules épithéliales, qui s'alignent sur une seule couche. Certaines protéines de polarité se repousseraient (interagiraient négativement) lorsqu'elles se situent dans la même cellule, mais s'attireraient (interagiraient positivement) lorsqu'elles se trouvent dans des cellules adjacentes (*ci-contre, à droite*). Ces interactions créeraient une alternance de régions bleues et roses, comme ci-dessous. Ainsi, d'une rangée à l'autre, le motif asymétrique se propagerait sur toute la couche de cellules jusqu'à ce qu'elle soit entièrement polarisée.

POLARITE DES AIMANT



POLARITE DES CELLULES EPITHELIALES

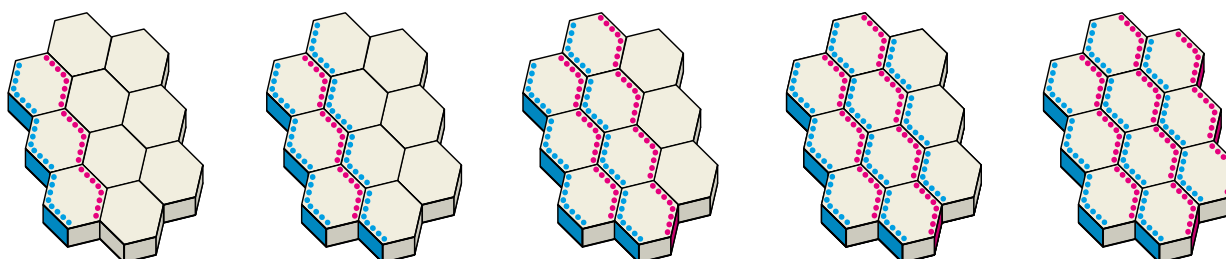
Interaction positive des protéines de cellules adjacentes



Interaction négative

entre protéines de la même cellule

Propagation de la polarité dans le temps



Couche de cellules épithéliales

Marek Mlodzik, de l'école de médecine cahn du Mont Sinai, à New York, et David et Helen Strutt, de l'université de Sheffield, en Angleterre, ont observé une série de distributions intrigantes. Par exemple, dans l'unique couche de cellules qui forme la surface de l'aile d'une mouche du vinaigre, les protéines Van Gogh se concentrent principalement sur le côté de la cellule le plus proche du corps. En revanche, les protéines frizzled s'accumulent surtout sur le côté le plus proche de l'extrémité de l'aile. Les protéines *starry night*, quant à elles, sont détectées sur les deux côtés des cellules.

Ces répartitions asymétriques nous ont suggéré, ainsi qu'à d'autres chercheurs, un modèle de fonctionnement du système de polarité planaire. Dans ce modèle, on postule l'existence de deux types d'interaction entre les protéines Van Gogh et frizzled – l'un qui attire les unes vers les autres et l'autre qui les repousse les unes des autres. Par exemple, les protéines Van Gogh situées sur le côté proximal d'une cellule d'aile (le côté de la cellule le plus proche du corps) semblent attirer les protéines frizzled sur la surface adjacente d'une cellule voisine – le côté distal de celle-ci. Et en même temps, à l'intérieur de chaque cellule, les protéines frizzled et Van Gogh se repoussent mutuellement, de sorte qu'elles se retrouvent sur des côtés opposés. Les mécanismes de ces forces d'attraction et de répulsion hypothétiques, encore inconnus, font l'objet d'intenses recherches.

Pour comprendre comment ce modèle propage des signaux directionnels au sein d'un groupe de cellules, imaginez une feuille composée de nombreuses rangées de cellules avec, dans chacune d'elles, des protéines de polarité planaire réparties plus ou moins au hasard. Maintenant, ajoutez sur le côté proximal de la feuille une nouvelle rangée de cellules dans lesquelles les protéines ne sont pas réparties au hasard : les protéines frizzled sont alignées sur le côté distal des cellules et les protéines Van Gogh, sur le côté proximal. Le modèle prédit que la force d'attraction entre les protéines frizzled de cette nouvelle rangée et les protéines Van Gogh de la rangée voisine attirera davantage de protéines Van Gogh vers la surface proximale de la rangée voisine (voir l'encadré page ci-contre).

En même temps, dans les cellules de cette rangée, à cause de la répulsion entre protéines Van Gogh et frizzled, les protéines

frizzled se rassembleront peu à peu sur le côté distal, à l'opposé des protéines Van Gogh. Ces protéines frizzled attireront à leur tour les protéines Van Gogh de la rangée suivante, qui se concentreront sur sa surface proximale. Ainsi, de proche en proche, l'organisation asymétrique des protéines de polarité planaire se propagera d'une rangée de cellules à une autre sur toute la surface de la feuille.

Ce modèle est en accord avec de nombreuses données expérimentales. Notamment, il expliquerait parfaitement pourquoi le petit greffon d'épiderme, sous la cuticule des punaises, produit des volutes continues de sensilles. En effet, il prédit que l'organisation asymétrique des protéines est extrêmement stable, car toute cellule indisciplinée – c'est-à-dire dont les protéines ne s'accumulent pas correctement – se réoriente dans le bon sens grâce aux signaux de ses voisines proximale et distale. De cette façon, chaque cellule crée sa propre boussole à partir des signaux reçus, laquelle définit l'orientation de la cellule et, en retour, influence celle de ses voisines.

Chez les mammifères

aussi

Bien sûr, les insectes ne sont pas les seuls animaux qui présentent une polarité planaire. Inspirés par les expériences menées sur la drosophile, des biologistes, dont l'un de nous (Jeremy Nathans), ont recherché des gènes de polarité planaire chez les vertébrés. Leurs expériences et des études ultérieures réalisées à partir du séquençage de plusieurs génomes ont révélé l'existence de gènes de polarité planaire très similaires dans tout le règne animal. En revanche, aucun gène de ce type n'a été détecté chez les plantes, ce qui suggère que les magnifiques motifs des fleurs et d'autres organes des plantes sont le fruit de systèmes de polarité totalement différents.

Curieusement, les mammifères présentent de multiples versions de chaque gène de polarité planaire de la drosophile. Par exemple, les humains et les autres mammifères ont trois gènes *starry night* différents et, de même, plusieurs gènes *frizzled* et *dishevelled* différents.

Jeremy Nathans s'intéresse en particulier à l'étude du système de polarité planaire chez les mammifères. Comme dans les

Les mammifères
présentent de multiples versions
de chaque gène
de polarité planaire
de la drosophile

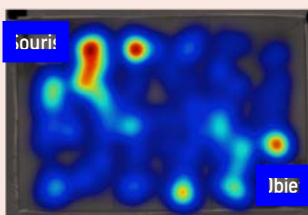
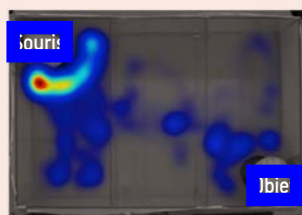
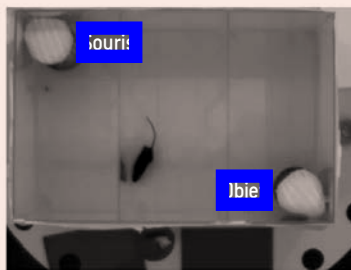
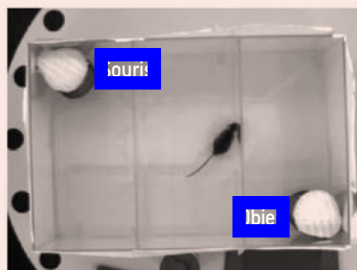
De la polarité au comportement

Depuis la découverte des gènes centraux de la polarité cellulaire planaire dans les années 1980, les biologistes s'aperçoivent, au fil des recherches, que ces gènes interviennent non seulement dans la peau en orientant les poils, les

d'autres tissus : le système cardiovasculaire, les muscles, les os, et même les oreilles et le système nerveux seraient sous leur contrôle.

Au départ, ces gènes n'étaient étudiés que chez les insectes. Mais en 2003, notre équipe a montré que leur fonction est conservée chez les mammifères en identifiant deux gènes de polarité planaire dans l'oreille interne, cette minuscule structure complexe enfermant la cochlée, qui analyse les sons, et

le vestibule, qui contrôle notre équilibre. Il suffit de regarder la surface d'un épithélium cochléaire pour comprendre que la moindre perturbation dans l'orientation des touffes ciliaires couvrant cet épithélium sera facilement identifiable (voir les photos page 66 *face à face*). En effet, chez des souris dont l'un



UNE SOURIS dont la voie de polarisation planaire a été perturbée (à droite) se comporte différemment d'une souris normale (à gauche) : dans une boîte où un objet et une autre souris occupent deux angles, la souris mutante ne présente pas de préférence pour l'animal, contrairement à celle non modifiée (plus la souris passe de temps dans une zone, plus celle-ci est rouge).

de ces gènes était muté, les touffes ciliaires étaient désorganisées. Depuis ces travaux, l'oreille interne a largement été utilisée pour identifier d'autres gènes de la polarité planaire, certains déjà connus chez les invertébrés, d'autres dont la fonction semble plus spécifique aux vertébrés et aux mammifères.

Le point commun de tous les organes affectés par la mutation de gènes de polarité planaire est une mauvaise coordination de la croissance du tissu, qui conduit à un organe mal formé et non fonctionnel. Ainsi, la voie de signalisation de la polarité planaire, définie par l'action coordonnée de ces gènes centraux, est une voie fondamentale du développement embryonnaire, au même titre que les voies classiques de signalisation (wnt, FGF, SHH). Mais alors que ces voies de signalisation s'appuient sur la diffusion de molécules, la voie de la polarité planaire, elle, dépend de contacts cellulaires couplés à des modifications précises et coordonnées du squelette des cellules.

Chez les mammifères, y compris

l'homme, des mutations dans les gènes de polarité planaire conduisent à des anomalies de la fermeture du tube neural, dont la conséquence la plus grave est une mise à nu du cerveau ou de la moelle épinière, incompatible avec la vie. Des fermetures incomplètes du tube neural de type *spina bifida* ont une issue généralement moins dramatique, mais conduisent parfois à de graves paralysies accompagnées de troubles sensitifs, voire cognitifs ou du comportement social.

expériences sur les insectes, les structures les plus faciles à étudier pour commencer se sont révélées être les poils de la peau. Contrairement à l'aile de la mouche, où chaque cellule produit un poil, chez les mammifères, chaque poil provient d'un follicule composé de dizaines à quelques centaines de cellules. De plus, à la différence des cellules voisines sur l'aile d'un insecte, chez le mammifère, les follicules pileux ne se touchent pas. En général, ils sont séparés les uns des autres par des dizaines de cellules cutanées. Malgré ces différences, l'élimination des gènes de polarité planaire produit à peu près le même résultat.

En 2004, Nino Guo, alors doctorant dans le laboratoire de Jeremy Nathans, a

utilisé des méthodes de génie génétique pour supprimer le gène *Frizzled6* chez des souris. Nino Guo et Jeremy Nathans ont constaté avec surprise que les follicules pileux de ces souris mutantes n'étaient plus parallèles, mais s'étaient réorientés en une série de volutes qui évoquaient les motifs observés sur les ailes de la drosophile mutante (voir encadré page 66).

Mais le laboratoire de Jeremy Nathans a obtenu des résultats plus surprenants encore lorsqu'il s'est intéressé à la façon dont les neurones sont connectés les uns aux autres dans le cerveau des mammifères. Les principales voies de connexion de ce réseau complexe s'établissent au cours du développement embryonnaire – lorsque

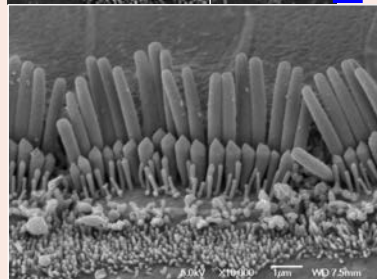
les neurones individuels projettent des axones (ces prolongements qui assurent la communication de longue portée dans le cerveau) vers leurs cibles le long de routes prédéfinies. Jeremy Nathans et son collègue Yanshu Wang ont découvert que *Frizzled3* joue un rôle essentiel dans le guidage des axones à travers le dédale du tissu neural embryonnaire.

Ils ont d'abord observé que, dans des souris mutantes privées du gène *Frizzled3*, les axones ne trouvaient plus leur chemin et suivaient des trajectoires aberrantes. L'équipe de Jeremy Nathans a ensuite voulu voir si le gène *Frizzled6*, si important pour l'organisation des poils, pouvait remplacer *Frizzled3*, et vice versa. En

DANS LA COCHLEE – l'élément de l'oreille interne qui perçoit et analyse les sons –, les cellules auditives sont coiffées chacune d'une touffe de stéréocils parallèles. Que ce soit dans la partie proximale (*en bas*) ou distale (*en haut*), les touffes sont toutes orientées de la même façon par rapport au plan défini par l'épithélium, et définissent ainsi un axe de polarité planaire. Quand des gènes de la polarité planaire sont mutés, l'orientation des touffes les unes par rapport aux autres est perturbée, ce qui peut conduire à des déficits auditifs.

Plus récemment, des études ont établi des liens entre des pathologies neurodéveloppementales ou neurologiques de type autistique ou épileptique et des mutations de gènes de polarité planaire. En mutant ces gènes chez la souris, notre équipe s'attache à comprendre comment la voie de signalisation contrôle la formation et la fonction de nos organes sensoriels et de notre système nerveux. Notamment, certaines régions de notre cerveau telles que l'hippocampe, crucial pour la mémoire, ne finissent leur maturation qu'après la naissance. Des résultats de notre laboratoire suggèrent que des perturbations de certaines formes de mémoire et des comportements sociaux anormaux seraient dus à un mauvais fonctionnement de la voie de polarité planaire (voir la figure page ci-contre). Le rôle des gènes de la polarité planaire s'étendrait donc bien au-delà de l'embryogénèse. Ils participeraient non seulement à la mise en place, mais aussi au maintien des fonctions sensorielles et cérébrales.

Mireille Montcouquiol et Nathalie Sans
Neurocentre Magendie, INSERM U1215,
université de Bordeaux



Utilisant des souris génétiquement modifiées, l'équipe a découvert que *Frizzled3* était tout à fait capable de remplacer *Frizzled6*, et de fournir un système pileux normal. En revanche, *Frizzled6* n'a pu que partiellement remplacer *Frizzled3* pour orienter la croissance des neurones. Ainsi, les systèmes de polarité planaire de la peau et du cerveau de la souris sont similaires, mais non identiques.

Depuis, l'étude des gènes impliqués dans la polarité planaire se poursuit. Chez les mammifères, par exemple, on recense à présent dix gènes ressemblant au gène *frizzled* de la drosophile, et l'équipe de Jeremy Nathans essaye de comprendre leurs rôles dans le développement. L'étude

de souris mutantes dépourvues d'un ou plusieurs de ces gènes a ainsi révélé que la voie de signalisation *frizzled* intervient dans des aspects très variés du développement tels que le guidage axonal, la croissance vasculaire, le développement de l'oreille interne, la fermeture du tube neural, le développement des reins et l'orientation du pelage. Ce qui soulève toujours plus de questions : cette voie de signalisation interviendrait-elle encore ailleurs ? Comment fonctionne-t-elle ? Des maladies seraient-elles liées à son dysfonctionnement ? Les biologistes sont loin d'avoir fini d'explorer ce qui, au début, ne semblait être qu'un petit groupe de gènes qui peignaient les poils... dans le sens du poil. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Sans et al., Planar cell polarity (PCP) gene mutations in autism spectrum disorder, intellectual disabilities and related deletion/duplication syndromes, dans C. Sala et C. Verpelli (éd.), *Neuronal and Synaptic Dysfunction in Autism Spectrum Disorder and Intellectual Disability*, Academic Press, pp. 189-219, 2016.

J. Devenport, The cell biology of planar cell polarity, *J. Cell Biol.*, vol. 202(2), pp. 121-129, 2014.

C. Wang et al., When whorls collide : The development of hair patterns in *Frizzled6* Mutant Mice, *Development*, vol. 137, n° 23, pp. 4091-4099, 2010.

P. N. Adler, Planar signaling and morphogenesis in *Drosophila*, *Developmental Cell*, vol. 2, n° 5, pp. 525-535, mai 2002.

V. McGinnis et M. Kuziora, Les gènes du développement, *Pour la Science*, n° 198, avril 1994.

Pourquoi les nazis n'ont pas eu la bombe

Manfred Poppe

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.

Hitler a causé la mort de dizaines de millions d'Européens. Dès lors, se dit-on avec effroi, s'il avait pu disposer de la bombe atomique, il s'en serait servi ! Que les physiciens allemands des années 1940, pourtant à la pointe mondiale de la physique nucléaire, ne la lui aient pas donnée apparaît donc comme un rai de lumière dans le plus sombre épisode de l'histoire allemande. C'est aussi une énigme, qu'historiens et physiciens ravalaient à résoudre depuis plus de soixante-dix ans.

Les historiens américains et britanniques furent les premiers à tenter d'écrire l'histoire de l'*Uranprojekt* – le « Projet uranium » que l'État nazi avait lancé en 1939 pour explorer l'« utilité de l'énergie des noyaux atomiques ». Sur le plan scientifique, ce projet était mené par l'*Uranverein* – le « club uranium » –, cent chercheurs de haut niveau rassemblés autour de Werner Heisenberg, l'un des pères de la théorie quantique. Longtemps, l'histoire de l'*Uranverein* est restée l'affaire exclusive des historiens américains et

L'EXPERIENCE ALLEMANDE B8

Elle a eu lieu en 1945 à Haigerloch, dans une cave à bière réaménagée en laboratoire. Il s'agissait d'explorer dans quelle mesure un réacteur contenant 664 cubes d'uranium plongés dans l'eau lourde pouvait évoluer vers la criticité, c'est-à-dire vers une réaction en chaîne incontrôlée. Résultat : pour cela, le réacteur aurait dû être 1,5 fois plus gros !

L'ESSENTIEL

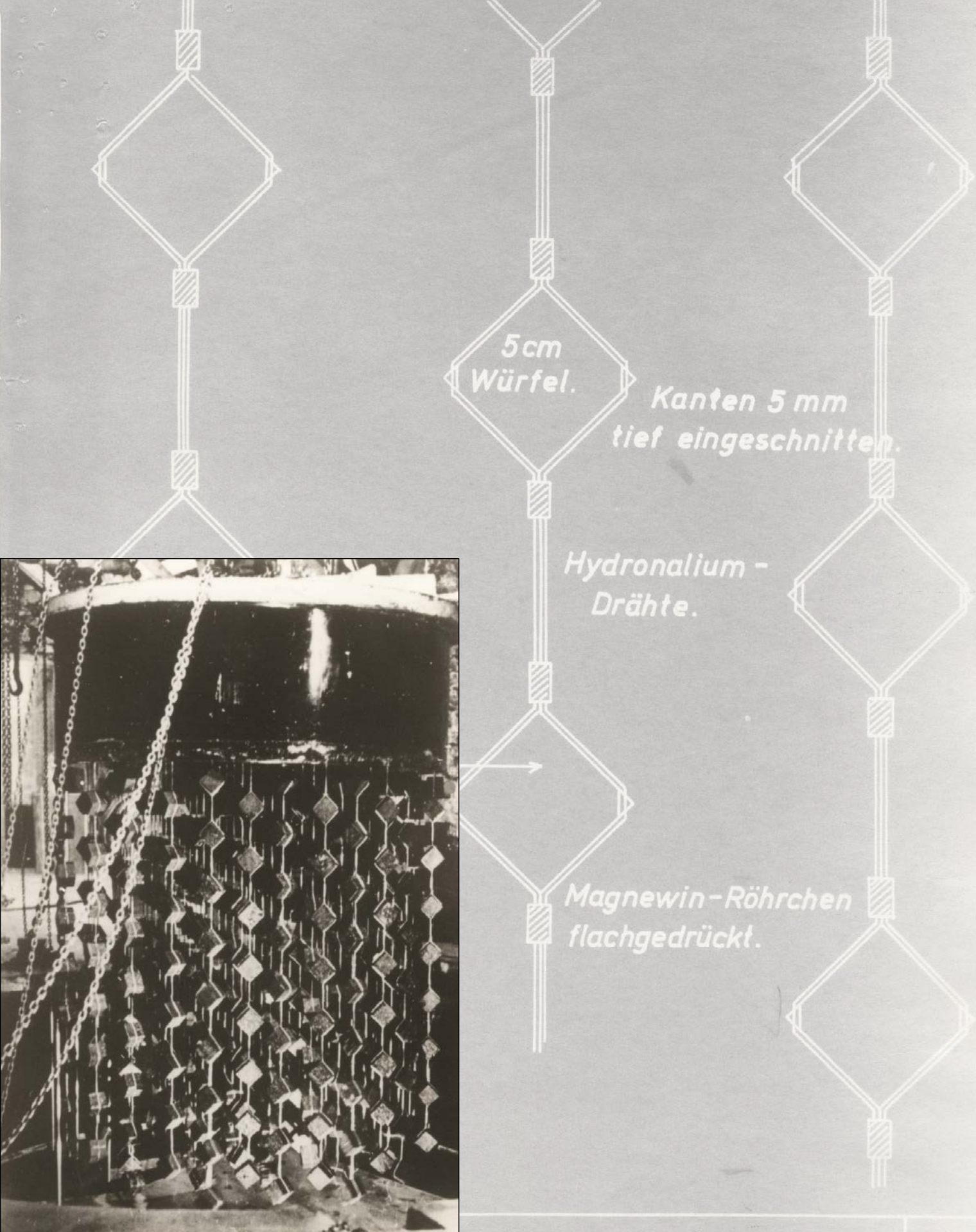
Les Etats-Unis ont développé une arme atomique parce qu'ils craignaient que les nazis n'en disposent eux aussi.

En réalité, les physiciens allemands confondaient le principe d'un réacteur nucléaire avec celui de la bombe, de sorte qu'ils n'ont pas travaillé sérieusement à son développement.

L'analyse des documents

Les secrets du projet de recherche nucléaire allemand montrent que, contrairement à ce que pensent les historiens, les physiciens allemands ignoraient le principe de fonctionnement de la bombe à uranium.

Illustration : M. H. / A. B.



britanniques. Leurs collègues allemands avaient bien pire à traiter que l'échec d'un projet de recherche, aussi terrible soit-il.

L'*Uranprojekt* confrontait les Alliés à un curieux paradoxe éthique : leurs chercheurs avaient développé la bombe atomique pour attrapper les physiciens allemands, lesquels étaient souvent leurs anciens professeurs, collègues ou camarades d'étude... Toutefois, en réalité, la course à la bombe dans laquelle ils s'étaient crus engagés n'avait pas eu lieu. Eux qui vivaient dans la sécurité d'une démocratie avaient travaillé avec acharnement afin de lâcher le monstre atomique dans le monde, tandis que leurs collègues allemands, qui survivaient dans l'insécurité d'une dictature inhumaine, n'avaient travaillé qu'à la mise au point d'un réacteur nucléaire...

Pas de bombe faute de moyens ?

Le premier livre jamais écrit sur l'*Uranverein* est celui de Samuel Goudsmit, intitulé *Alsos* et publié en 1947. Né en Hollande, ce physicien nucléaire dirigea l'opération Alsos, menée par l'armée américaine pour occuper dès que possible les installations de l'*Uranverein*, arrêter ses membres, les interroger et mettre en sécurité leurs documents. Dans son livre, il écrit que les Allemands avaient travaillé pendant la guerre à un réacteur et non à une bombe, car ils n'avaient pas compris la différence...

Malgré ce témoignage clé, la version dominante de l'histoire de l'*Uranverein* est celle de l'historien américain Mark Walker (*Nazi Science: Myth, Truth, And The German Atomic Bomb*, 2001). Selon lui, le projet de bombe atomique allemande aurait échoué parce que sa réalisation dépassait les possibilités économiques du III^e Reich dans les conditions de la guerre ; une réalité que le gigantisme du Projet Manhattan – le projet américain de bombe atomique – confirme.

Outre la version de Mark Walker, deux livres opposés dans leurs conclusions, mais bien documentés, ont paru : celui de l'historien américain Thomas Powers, qui fait de Heisenberg un héros de la résistance (*Heisenberg's war*, 1993), et celui de son collègue Paul Rose, pour qui Heisenberg aurait plutôt été un nazi incapable qui aurait voulu développer la bombe, mais aurait échoué (*Heisenberg and the Nazi Atomic Bomb Project*, 2001). Tout physicien nucléaire s'étonne que deux versions aussi opposées

L'AUTEUR



Manfred POPP, physicien nucléaire, a longtemps dirigé le programme de recherche

nucléaire civil allemand

puissent être déduites des mêmes sources. En fait, toutes deux sont plausibles, mais la réalité est probablement intermédiaire.

Le premier livre d'un historien allemand n'a paru qu'en 2005. Dans son ouvrage *Hitlers Bombe*, Rainer Karlsch décrit les activités de l'*Uranverein* de façon plus correcte sur le plan scientifique que Mark Walker. Il surprend toutefois en affirmant qu'à la fin de la guerre, le *Heereswaffenamt*, c'est-à-dire le Bureau central pour la production d'armes de l'armée allemande – la *Wehrmacht* – aurait développé et testé des bombes à fusion en tant que petites armes tactiques. Ses arguments n'ont convaincu aucun physicien.

Quoi qu'il en soit, Paul Rose et Rainer Karlsch sont tous deux convaincus que les physiciens allemands savaient calculer la masse minimale de matière fissile nécessaire pour produire une bombe, ce que l'on nomme la masse critique, et qu'ils l'avaient fait dans le cas du plutonium. Pour sa part, Mark Walker estime cela possible. Selon ces historiens, les chercheurs de l'*Uranverein* auraient découvert quasi en même temps que les physiciens alliés que, pendant le fonctionnement d'un réacteur à uranium, un nouvel élément comptant 94 protons – l'« élément 94 » – se forme. Ils auraient alors déduit de la

VERNER HEISENBERG est

à la fois l'un des plus grands physiciens théoriciens du XX^e siècle, un père de la théorie quantique, un chercheur mal vu par les nazis et, avec Carl Friedrich von Weizsäcker, l'un des premiers dirigeants de l'*Uranprojekt*, un projet qu'il a contribué à concentrer sur la physique d'un réacteur nucléaire, plutôt que sur celle de la bombe. Par volonté d'évitement implicite, semble-t-il.

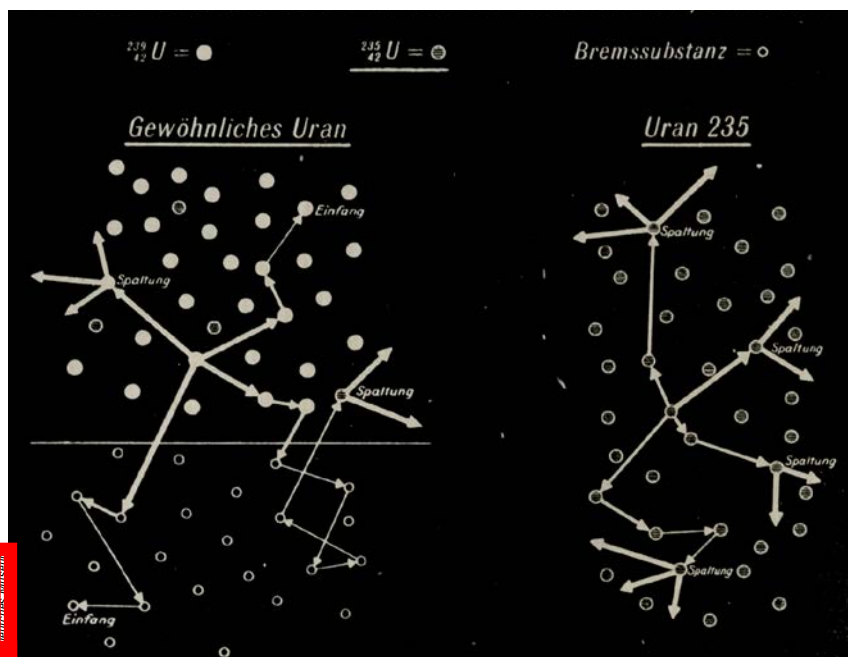


théorie nucléaire du physicien danois Niels Bohr que cet élément est plus fissile que l'uranium 235, l'isotope d'uranium le plus fissile. Or cela semble très improbable d'un point de vue scientifique.

L'élément 94 n'a été découvert qu'en 1941 aux États-Unis, où il fut nommé plutonium, et les chercheurs allemands ne l'apprirent qu'en 1946. Comment aurait-il pu en être autrement ? Leurs réacteurs expérimentaux ne pouvaient produire de plutonium ! Jeremy Bernstein, un physicien qui a beaucoup publié sur l'*Uranprojekt*, s'est demandé pourquoi les chercheurs allemands n'avaient pas, comme leurs collègues américains, créé quelques microgrammes de plutonium dans l'un de ces accélérateurs circulaires – un cyclotron – que l'on emploie tant en physique nucléaire. Au cours des années 1930 en effet, plusieurs pays européens en avaient construit, mais l'Allemagne n'en possédait pas. Elle aurait pu réquisitionner les cyclotrons de la France et du Danemark occupés, mais rien ne fut entrepris en ce sens. Les chercheurs allemands ne pouvaient donc connaître les propriétés de l'élément 94, ce qui exclut qu'ils aient pu calculer une masse critique de plutonium.

La piste de la bombe à uranium 235

Il leur restait donc à suivre la piste de la bombe à uranium, mais, là non plus, ils ne firent pas le nécessaire. L'idée, celle du Projet Manhattan, consiste à établir une réaction en chaîne explosive dans l'uranium. Pour cela, il faut, plutôt qu'employer des neutrons ralentis comme y poussait l'intuition physicienne dans les années 1940, employer des neutrons de haute énergie, donc rapides. En effet, les physiciens pensaient plutôt à employer des neutrons lents parce que leur probabilité de déclencher une fission est 600 fois plus élevée que celle des neutrons rapides. Cependant, les neutrons rapides déclenchent des fissions bien plus vite, de sorte que lancés dans une population d'uranium 235 assez dense, ils déclenchent une réaction en chaîne explosive : la fission d'un premier noyau bombardé par un neutron produit des neutrons qui déclenchent plusieurs nouvelles fissions, etc. Pour cette raison, avec des neutrons rapides, la réaction en chaîne peut se développer avant que la dilata- tion de l'explosif nucléaire due à la chaleur n'ait fait chuter la densité d'atomes



DANS UN DESSIN DE 1942, HEISENBERG a schématisé, sans le dire explicitement, les réactions en chaîne dans un réacteur (à gauche) et dans une bombe (à droite). Dans le cas du réacteur, un neutron émis par un atome d'uranium 235 fissionné parvient dans le modérateur, un milieu inerte où les collisions avec les atomes le ralentissent (en bas). Il déclenche alors la fission d'un autre atome d'uranium. Dans une bombe en revanche, les fissions successives sont directement déclenchées par les neutrons qu'émettent les atomes d'uranium 235 fissionnés.

fissiles au point d'arrêter le processus. Évaluer la densité minimale d'uranium 235 nécessaire revient à calculer la masse critique. Pour cela, encore faut-il connaître la probabilité de déclenchement d'une fission par un neutron rapide. En termes de physicien, cela revient à mesurer les « sections efficaces » de l'uranium 235 bombardé par des neutrons rapides. Rien n'indique que l'*Uranprojekt* l'ait fait.

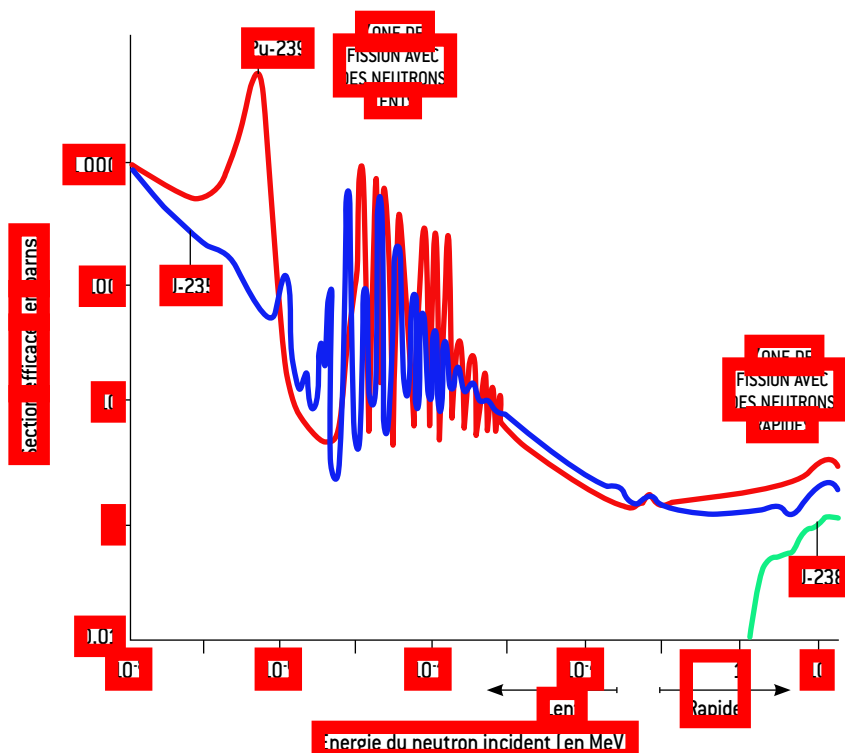
Ses physiciens ne se sont préoccupés en fait que des sections efficaces immédiatement utiles au fonctionnement d'un réacteur : celles de l'uranium naturel bombardé par des neutrons lents. Comme Niels Bohr avait montré que l'uranium 238 ne peut être fissionné par des neutrons de cette énergie (voir la figure page 74), on se concentrait sur les fissions de l'uranium 235, dont l'abondance naturelle n'est que de 0,7202 %...

Lorsque l'on bombarde de l'uranium naturel avec des neutrons rapides, les fissions de l'uranium 235 sont noyées dans celles, bien plus nombreuses, de l'uranium 238. Une séparation isotopique assez poussée pour obtenir des échantillons suffisamment enrichis en uranium 235 aurait pu permettre aux physiciens allemands d'obtenir la section efficace de l'uranium 235 bombardé par des neutrons rapides. Elle ne fut pas réalisée.

Pour déterminer la section efficace de l'uranium 235, les chercheurs de l'*Uranverein* auraient aussi pu prendre une autre voie. Josef Mattauch de l'institut Kaiser Wilhelm de chimie était un spécialiste de la spectroscopie de masse des isotopes. Il aurait pu séparer quelques microgrammes d'uranium 235, puis on s'en serait servi pour déterminer les sections efficaces utiles dans les cyclotrons de Paris ou de Copenhague. Rien ne fut entrepris en ce sens.

Or aucun historien n'a remarqué que l'*Uranverein* ne connaissait pas les sections efficaces nécessaires au calcul des masses critiques de bombes à l'uranium ou au plutonium, ni qu'il avait la possibilité de les déterminer, mais ne l'a pas fait !

L'autre condition nécessaire à la construction de la bombe est de connaître son principe de fonctionnement. L'*Uranverein* la remplissait-il ? Les rapports secrets de recherche allemands nous renseignent à ce propos : il semble que non. Jusqu'en 1942, les chercheurs les adressaient au *Heereswaffenamt*, leur donneur d'ordre. Il est frappant de constater que dans toute cette masse de documents, de nombreuses fois copiés à la machine afin d'informer les membres de l'*Uranverein*, très peu concernent la bombe.



LES PROBABILITES DE COLLISION D'UN NEUTRON AVEC UN ATOME D'URANIUM 235 (en bleu) ou de plutonium 239 (en rouge), c'est-à-dire les sections efficaces de ces éléments, sont cent fois plus grandes à basse énergie (neutrons lents) qu'à haute énergie (neutrons rapides), ce qui a amené les chercheurs de l'*Uranverein* à estimer que la bombe nécessitait une réaction en chaîne déclenchée et entretenue par des neutrons lents. En réalité, construire une bombe nécessite un chauffage assez rapide de la matière fissile pour que des neutrons rapides y soient produits et entraînent une réaction en chaîne explosive avant que sa dilatation ne l'interrompe...

En décembre 1939, Heisenberg écrivit ainsi un premier rapport entièrement consacré à l'énergie nucléaire. On n'y trouve qu'une unique phrase sur la bombe, ou plus exactement sur un réacteur transformé en bombe: «L'enrichissement d'uranium 235, qui permet de construire des réacteurs très compacts, serait aussi la seule méthode d'obtention d'un explosif dont la puissance dépasse de plusieurs ordres de grandeur celle des explosifs conventionnels.»

Avant d'écrire cela, Heisenberg avait estimé que pour créer un tel réacteur explosif, il faudrait de nombreux kilogrammes d'uranium 235, une entreprise qu'il qualifiait d'«horrible», puisque l'on ne parvenait alors à séparer les isotopes que par microgrammes. Ainsi, la «bombe» – en réalité un réacteur censé exploser – semblait à Heisenberg pensable, mais irréalisable. Dans la partie détaillée de son rapport, il décrit l'explosion. L'énergie des neutrons qu'il donne – 300 électrons-volts – est 10 000 fois plus petite que celle des neutrons rapides nécessaires en réalité. Du reste, Samuel Goudsmit,

Jeremy Bernstein, Paul Rose et Rainer Karlsch ont remarqué à juste titre que la bombe correspondante ne serait pas plus puissante qu'une bombe conventionnelle! De son côté, Mark Walker semble déduire de la phrase de Heisenberg que le principe correct de la bombe était connu...

A ce stade, soulignons que, pour un physicien nucléaire de l'époque, l'emploi de neutrons lents pour obtenir une explosion avait un sens. Dès 1934, le physicien italien Enrico Fermi avait en effet découvert que les neutrons d'énergie réduite déclenchent des réactions nucléaires plus efficaces (voir la figure ci-dessus). Le fait que, pour produire une réaction en chaîne explosive, il faille en réalité employer des neutrons rapides n'apparaît que si l'on étudie la thermodynamique de la réaction.

Un autre élément suggère que l'*Uranverein* ne connaissait pas le principe de fonctionnement de la bombe. Paul Müller, doctorant sous la direction de Heisenberg, a calculé les valeurs des paramètres physiques à atteindre pour déclencher une explosion nucléaire: il a conclu qu'il faudrait enrichir l'uranium 235

à 70% et qu'il y aurait un grand besoin de modérer l'énergie des neutrons. Si le premier résultat semble bon, le second l'annule car, dans une bombe, les modérateurs sont des poisons. Une erreur que Paul Rose et Rainer Karlsch ont remarquée. Walker, pour sa part, n'a tenu aucun compte du rapport de Müller, le seul exclusivement consacré aux explosifs nucléaires...

Une troisième preuve surgit de la lettre que Karl Wirtz écrivit à l'Office des brevets du Reich. Cet important collaborateur de Heisenberg y décrit une plaque d'uranium 235 d'une surface de un mètre carré et épaisse de quelques millimètres insérée entre deux couches modératrices de l'énergie des neutrons. Or il écrit que ce dispositif peut soit servir de source de chaleur inépuisable, soit exploser avec une violence extrême. Ainsi, pour les physiciens de l'*Uranverein*, un réacteur et une bombe étaient censés fonctionner sur le même principe et avaient la même forme.

Le rapport de 1942 au Heereswaffenamt

Une autre incompréhension semble avoir durablement influencé le travail des historiens: elle est liée à l'interprétation du rapport de 1942 au Heereswaffenamt. Ce document, écrit en préparation d'une réunion décisive pour le soutien à l'*Uranprojekt*, est extraordinairement précieux, car il détaille les connaissances qu'avaient alors les physiciens du projet. Une fois de plus, Mark Walker y découvrit une phrase semblant indiquer que la masse critique était connue: «Pour allumer l'explosif, on doit pouvoir en rassembler en un même lieu de 10 à 100 kilogrammes». Un intervalle qui correspond de façon impressionnante à celui qui venait d'être fixé aux États-Unis: de 2 à 100 kilogrammes.

Toutefois, les explications physiques présentées dans la partie détaillée du rapport mettent clairement en évidence une conception fautive du principe de la bombe. Dès la table des matières, celle-ci est présentée comme un cas particulier de réacteur! Plus loin, alors que l'on présente les processus de production des neutrons, seuls ceux importants pour les réacteurs sont cités. Rien n'est dit sur la production de neutrons rapides pour fissionner l'uranium 235.

Comme ce rapport était très difficile à obtenir, beaucoup d'auteurs se sont fiés

Mark Walker. Seuls Paul Rose et Rainer Karlsch ont remarqué l'erreur commise, mais, pour des raisons incompréhensibles, ils ont supposé que cet intervalle de valeurs se rapportait à une bombe à plutonium, un élément pourtant inconnu de l'*Uranverein*... Pendant plus d'un quart de siècle, les documents destinés au *Heereswaffenamt* sont passés pour une preuve de l'existence de connaissances suffisantes sur le fonctionnement d'une bombe. Ceux qui adoptaient ce point de vue – celui de Mark Walker – n'étaient pas gênés par le fait que le calcul de la masse critique soit le seul aspect non rapporté dans le rapport: «Peu importe qui a procédé à cette estimation et comment elle a été faite», écrit-il.

Il est étonnant que cette erreur de Mark Walker n'ait pas été aperçue: l'intervalle de 10 à 100 kilogrammes correspond bien en effet à la masse de matière fissile du réacteur que décrit Heisenberg: un réacteur ralentissant les neutrons, comme nombre de réacteurs actuels. Or de tels réacteurs ne peuvent exploser comme une bombe... Il se pourrait que Wirtz ait calculé cet intervalle à l'occasion de sa lettre au Bureau des brevets du Reich. Étant donné la très haute densité de l'uranium ($19,1 \text{ g/cm}^3$), une plaque de un mètre carré et de quelques millimètres d'épaisseur de cet élément pèse en effet entre 10 et 100 kilogrammes. L'*Uranverein* avait donc calculé la masse critique d'un réacteur et croyait qu'avec de l'uranium suffisamment enrichi, un tel réacteur se muerait en bombe atomique...

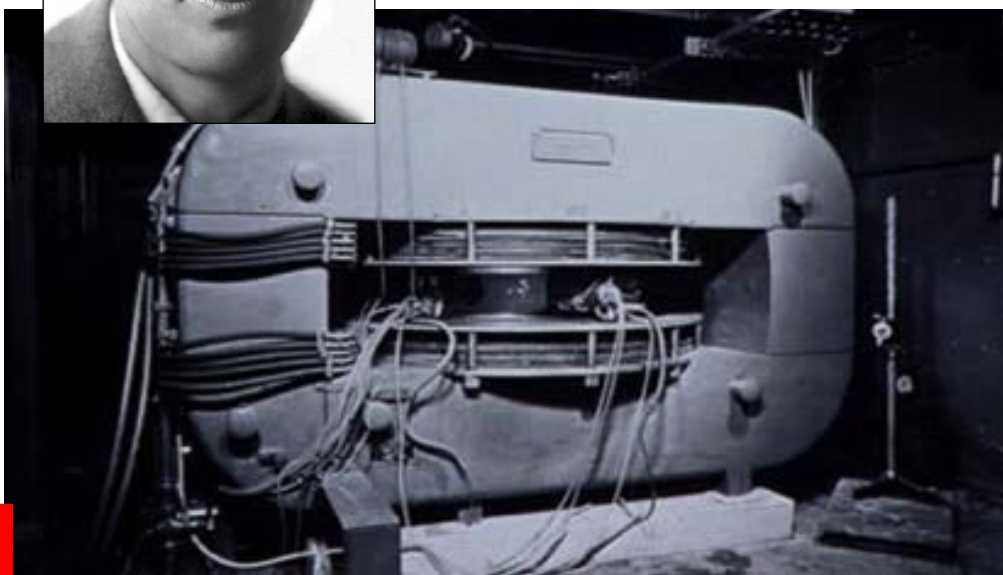
Une fois ce fait réalisé, on peut aussi s'expliquer les affirmations non vérifiées mais durables de l'après-guerre selon lesquelles Heisenberg évoquait pendant la guerre une masse critique de 50 kilogrammes. Pendant la conférence de février 1942, il montra dans sa communication introductive une représentation schématique des phénomènes à l'œuvre pendant les réactions de fission avec de l'uranium naturel (à gauche sur la figure page 73) ou de l'uranium 235 (à droite). Et pour la première fois, aucun modérateur n'est représenté dans la version avec de l'uranium 235. Il semble donc que le principe correct de la bombe soit signifié, mais, dans le texte du rapport, il n'est aucunement question d'obtenir la fission à l'aide de neutrons rapides. Après la guerre, Heisenberg a affirmé avoir toujours su que la bombe n'était possible qu'avec l'aide de neutrons rapides. Pour



LE SYNCHROTRON DE PARIS, construit par Frédéric Joliot-Curie (ci-dessus), aurait pu servir à l'*Uranverein* à produire du plutonium ou à déterminer les sections efficaces de l'uranium 235 ou du plutonium 239, mais les physiciens allemands ne l'ont pas exploité, même si l'un d'entre eux avait été envoyé à Paris afin de contrôler l'usage de la machine.

autant, jusqu'à la fin de la guerre, il n'a jamais évoqué cette possibilité avec qui que ce soit et, après, il n'a jamais avoué son échec à construire la bombe atomique. Heisenberg n'était pas près du but. Il commençait tout juste à comprendre la physique de la bombe, alors qu'aux États-Unis, les physiciens la maîtrisaient déjà en 1940. Et il n'a pas fait un pas de plus!

Même le troisième et dernier directeur du projet uranium, Walther Gerlach, ne connaissait pas les nouvelles réflexions de Heisenberg. C'est ce que prouve sa lettre de novembre 1944, dans laquelle il répond au reproche selon lequel l'*Uranverein* travaillerait trop peu à de petites bombes atomiques transportables en fusée: «malheureusement», écrit-il, la «multiplication turbulente» des neutrons ne serait possible qu'à partir de plusieurs tonnes d'uranium et en utilisant un modérateur. Goudsmit a publié cette lettre pour prouver que, jusqu'à la fin de la guerre, l'*Uranverein* avait un concept de bombe inadéquat. Toutefois, Mark Walker a affirmé que Gerlach décri-



ait des essais de réacteur. C'est illogique, non seulement à cause du contexte de la lettre, mais aussi pour une raison évidente: après une «multiplication turbulente» des neutrons, il ne reste pas grand-chose d'un réacteur...

Mon analyse des documents disponibles donne raison à Goudsmit qui, dès 1947, disait pour résumer que l'*Uranverein* n'avait pas compris la différence entre une bombe et un réacteur nucléaire. Goudsmit était bien placé pour porter un tel jugement puisque, physicien nucléaire lui-même, il

Il était lié d'amitié avec Heisenberg avant la guerre, maîtrisait l'allemand, connaissait les documents qu'il avait rassemblés, pouvait en évaluer le contenu, avait vu de nombreux laboratoires allemands et arrêté et interrogé lui-même leurs chercheurs... Sa relation aux Allemands était cependant très chargée, puisque ses parents avaient été assassinés à Auschwitz.

Le retour à l'opinion de Goudsmid a en plus l'avantage de rendre leur cohérence à tous les éléments connus. Ainsi, on comprend aujourd'hui pourquoi les physiciens allemands n'ont pas essayé de déterminer les sections efficaces de la fission par des neutrons de haute énergie à l'aide d'un cyclotron : ils ignoraient que les neutrons rapides étaient essentiels au principe d'une bombe !

Point remarquable, tous nos arguments peuvent être vérifiés à l'aide d'une autre source : la transcription des écoutes de Farm Hall. À l'été 1945, les Alliés enfermèrent les physiciens les plus importants de l'*Uranverein* dans cette grande maison rurale (voir la photo ci-contre) afin de les écouter parler à leur insu. Leurs réactions à l'annonce de l'explosion de la bombe de Hiroshima sont significatives : certains, tels Otto Hahn, furent immensément soulagés de ne pas avoir construit la bombe ; d'autres furent affligés dans leur patriotisme de constater que la physique nucléaire allemande était dépassée.

Pendant les jours qui suivirent, les physiciens essayèrent fébrilement de comprendre le fonctionnement de la bombe, mais la faiblesse du contenu de leurs échanges trahit. Interrogé par Hahn, Heisenberg reconnaît ne jamais avoir calculé la masse critique, ce qu'il a effectué à Farm Hall. Lors de sa première tentative, il commet d'énormes erreurs de calcul et obtient une masse critique d'une tonne... Comme il s'était trompé dans la détermination du volume d'une sphère d'uranium à partir de son rayon, son véritable résultat aurait dû être 13 tonnes ! En écoutant l'enregistrement, les deux grands experts de la bombe atomique de l'époque qu'étaient Edward Teller (souvent présenté comme le père de la bombe à hydrogène) et Hans Bethe, le directeur du département théorique du Projet Manhattan, conclurent que Heisenberg tentait ce calcul pour la première fois, de sorte qu'il commettait toutes les erreurs de débutant

par lesquelles eux aussi étaient passés. Les tentatives des chercheurs allemands pour deviner les sections efficaces de la fission de l'uranium 235 remplissent de nombreuses pages de transcription de Farm Hall. Elles prouvent leur ignorance.

Une semaine après ce premier exercice, Heisenberg avait progressé. Dans un exposé, il explicita tous les points essentiels de la physique d'une bombe nucléaire, s'interrogeant en particulier sur la question de sa puissance, qu'il sous-estima encore. Les connaissances divulguées pendant cet exposé furent souvent présentées comme la preuve de la pertinence des idées des physiciens allemands, mais celles-ci n'ont été acquises qu'après la guerre et au vu et au su des réalités manifestées à Hiroshima.

Les comptes rendus des enregistrements de Farm Hall confirment donc ce que dicte l'étude attentive des documents : l'*Uranverein* ignorait le principe d'une bombe nucléaire. Les fautes de débutant de Heisenberg traduisent qu'il n'avait jamais fait ces calculs auparavant. Son séminaire à Farm Hall montre aussi qu'une semaine de travail lui suffit pour parvenir au principe fondamental de la bombe. Tout cela contredit l'affirmation de Paul Rose suivant laquelle il n'en était pas capable, ainsi que la théorie de Thomas Powers selon laquelle il aurait réussi très tôt. On peut donc en déduire ce qu'aucun historien

En 1937, le journal de la SS accuse Heisenberg d'être un « Juif blanc » soutenant des théories « non allemandes »

Il n'a vu : durant toute la guerre, Heisenberg n'a pas réfléchi sérieusement à la bombe pendant toute une semaine !

Trente à quarante ans après la guerre, j'étais devenu le directeur du programme fédéral allemand de recherche nucléaire, donc en quelque sorte le successeur de Gerlach. Quelque chose d'étonnant m'apparut dans la façon de travailler de l'*Uranverein*. Quand on aborde un terrain technique inconnu, il est normal d'explorer plusieurs pistes à la fois. Avec le temps, on concentre les ressources sur les voies intéressantes et, finalement, de les consacrer à la plus prometteuse.



Or, au sein de l'*Uranverein*, c'est le contraire qui s'est produit. Au cours des années, le nombre de réacteurs expérimentaux et de procédés explorés a augmenté, ce que les historiens ont attribué à des faiblesses dans la conduite du projet. Toutefois, comme aucune tentative de rassemblement des moyens n'a jamais eu lieu, il semble vraisemblable que le projet n'était pas orienté vers le succès. Pas sérieusement.

Or beaucoup de ses chercheurs – surtout les plus jeunes – pouvaient craindre, en cas d'arrêt de leur projet, de ne pas être réaffectés à d'autres recherches, mais envoyés au front... Les petites équipes dispersées menant des projets partiels dont ils faisaient partie représentaient donc autant de chances de rester en vie. Pendant que des millions d'Européens tombaient au combat, mouraient dans les villes bombardées

ou se faisaient assassiner dans les camps, leurs petits instituts installés en province pouvaient pour l'essentiel continuer à faire de la recherche librement. Même si les moyens personnels et financiers étaient ridicules par rapport à la tâche fixée, ils étaient bien plus importants que dans les trente années précédentes, marquées par la première guerre mondiale et la crise de 1929. Un gros projet centralisé aurait détruit cette idylle et serait devenu moralement dangereux.

De fait, même Abraham Esau, que le *Wehrmacht* avait chargé en 1939 d'initier l'*Uranprojekt*, avait conseillé à ses collègues



LE MANOIR DE FARM HALL fut la prison dorée, mais secrètement équipée de microphones, de dix des physiciens les plus importants de l'*Uranverein*. Les conversations entre physiciens, notamment le jour où ils apprirent l'explosion de Hiroshima, suggèrent qu'à la fin de la guerre, les meneurs de l'*Uranprojekt* ignoraient toujours comment obtenir une bombe nucléaire.

d'éviter de parler de la bombe: «S'il devait être possible de construire une bombe atomique, vous serez forcés au travail. Et si deux ans après le début du projet, aucune bombe n'est là, alors vous serez perdus.» Tous les chercheurs et les cadres responsables craignaient donc de lancer un grand projet. Si l'on avait considéré que la bombe pouvait être obtenue en un temps raisonnable, le projet en aurait été avancé. Sans doute est-ce pourquoi il était préférable pour les physiciens allemands de ne pas se pencher trop intensément sur la physique de la bombe...

Assez générale au sein de l'*Uranverein*, cette attitude caractérisait tout particulièrement Heisenberg. Il y avait des raisons pour cela! En juillet 1937, le journal de la SS l'avait accusé d'être un «Juif blanc» – pour les nazis, quelqu'un censé se comporter comme un Juif sans l'être – parce qu'il pratiquait une physique «non allemande», à savoir la relativité et la physique quantique. Or la parution d'une attaque dans ce journal pouvait signifier un internement, puis la mort en camp de concentration... Heisenberg parvint à obtenir sa réhabilitation de Heinrich Himmler, le dirigeant de la SS, mais cela prit une année entière d'interrogatoires... Sans doute fut-il sauvé par les interventions de son collègue Ludwig Prandtl qui, en tant que directeur de l'institut Kaiser Wilhelm pour la recherche en dynamique des fluides jouait un rôle particulièrement important dans la montée en puissance de la *Luftwaffe*, l'armée de l'air

BIBLIOGRAPHIE

M. Popp, *Misinterpreted documents and ignored physical facts: The History of « Hitler's atomic bomb »*, *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte*, vol. 39, pp. 265-282, 2016.

B. C. Reed, *The Physics of the Manhattan Project*, Springer, 2015.

Rainer Karlsch, *Hitlers Bombe. Die geheime Geschichte der deutschen Kernwaffenversuche*, DVA, 2005.

Paul Rose, *Heisenberg and the Nazi Atomic Bomb Project, 1939-1945*, University of California Press, 2001.

Hans Bethe, *The German Uranium project*, *Physics Today*, vol. 53(7), pp. 34-36, 2000.

Mark Walker, *Nazi Science: Myth, Truth, and the German Atomic Bomb*, Perseus, 1995.

Mark Walker, *German National Socialism and the Quest for Nuclear Power, 1939-1949*, Cambridge University Press, 1995.

Otto Hahn, *Mein Leben*, Bruckmann, 1968.

allemande. Sans doute est-ce à cette époque qu'il devint clair pour Heisenberg que l'on ne pouvait taire au régime nazi que ce que l'on ignorait. Comme le suggère son efficacité scientifique à Farm Hall, ne jamais avoir recherché sérieusement le principe de fonctionnement correct de la bombe pendant la guerre n'était pas la marque d'une incompétence, mais plutôt celle d'une clairvoyance.

Cela répond finalement à une question que se poseront peut-être certains physiciens: même si le fait de s'occuper d'une bombe irréalisable en un temps raisonnable pouvait passer pour du temps perdu, la curiosité si intense des physiciens allemands aurait dû les pousser à essayer de trouver quels phénomènes se produisent dans une telle machine infernale. Leur peur des nazis fut manifestement plus forte que leur curiosité.

Ainsi, les historiens ont répandu sur l'histoire de l'*Uranverein* une épaisse couche d'erreurs, malgré les objections de nombreux physiciens américains et allemands. Ma conclusion est simple: les chercheurs du III^e Reich ignoraient comment construire la bombe atomique; dès lors, ils n'ont rien entrepris pour en construire une. Certes, le réacteur qu'ils ont essayé de faire fonctionner aurait pu être une première étape vers la bombe au plutonium. Toutefois, comme ils méconnaissaient la physique de la bombe, les recherches qu'ils menaient n'avaient en réalité qu'un objectif civil. Ce ne furent donc pas des limites économiques qui évitèrent que Hitler ne se retrouve doté d'une bombe atomique; en tout cas, les physiciens allemands n'ont jamais été près d'en obtenir une. En réalité, ces derniers ont fait un grand détour pour éviter d'avoir à construire une bombe nucléaire. La véritable raison de l'échec de l'*Uranverein* est la terreur que lui inspiroient les nazis.

Ainsi, nous pouvons avoir une pensée consolatrice: c'est bien l'effrayante inhumanité du régime nazi qui l'a privé d'arme nucléaire. Sous un régime démocratique, les chercheurs allemands auraient sans doute travaillé avec zèle à la bombe et peut-être avec la même efficacité que ceux du Projet Manhattan. Troublé d'être le découvreur de la fission nucléaire, Otto Hahn a sans doute prononcé les mots pouvant clore le débat sur l'*Uranverein*: «Je remercie Dieu à genoux de nous avoir évité de développer la bombe à uranium.»

LOGIQUE & CALCUL

Vers du calcul sans coût énergétique

De nouvelles expériences sur de petits calculs confirment qu'un minimum d'énergie est nécessaire pour les effectuer. Mais la maîtrise du calcul réversible pourrait rendre caduc cet obstacle thermodynamique.

Jean-Paul DELAHAYE

L'information est-elle un concept physique comme l'énergie ou la masse, ou un concept purement mathématique qui n'a de sens que pour des êtres doués d'intelligence et qui n'intervient directement dans aucune loi proprement physique ?

En thermodynamique, on se pose cette question depuis longtemps et plus particulièrement depuis que l'on a noté des similarités entre la notion d'entropie physique

née au XIX^e siècle avec Rudolf Clausius, et la notion d'entropie mathématique, dont la théorie de l'information de Claude Shannon a proposé une première version, complétée par Andreï Kolmogorov.

La question est directement liée à celle du coût minimal des opérations de calcul, qui détermine le devenir à long terme de tous nos dispositifs informatiques. Mais elle est aussi importante sur un plan philosophique, pour savoir si la physique doit devenir une

théorie matérielle de l'information. Où en sommes-nous aujourd'hui sur ces questions ?

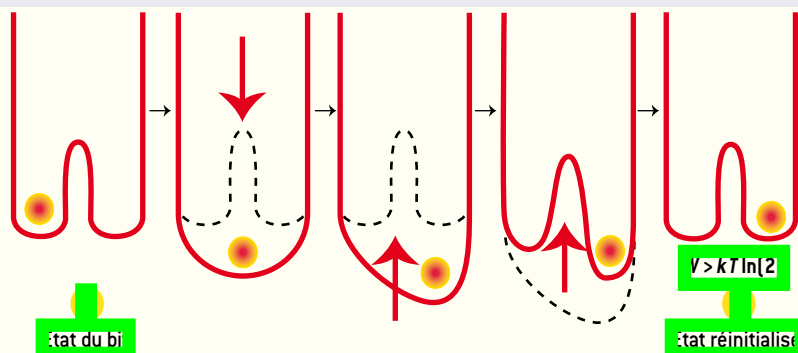
Nos microprocesseurs chauffent, ce qui est devenu un problème avec la miniaturisation des circuits. Plus précise que la « loi de Moore » qui prédit un doublement de la puissance de calcul des puces informatiques tous les 18 mois, la « loi de Koomey » indique que, grâce à la miniaturisation, le nombre d'opérations de calcul par joule dépensé double tous les 18 mois environ. L'étude des chiffres

Le principe de Landauer testé avec succès

Le principe de Landauer énonce que lorsqu'une opération logique irréversible est

menée, par exemple effacer une information dans une mémoire d'ordinateur, alors une certaine énergie est inévitablement dépensée ; à l'issue de l'opération,

est discuté depuis 1961. C'est seulement depuis 2012 que l'on a réussi à mener des expériences suffisamment précises pour le tester (voir les quatre références de la bibliographie signalées par un astérisque).



La plupart des expériences consistent à créer une mémoire de un bit en piégeant une particule dans un double puits de potentiel (trait rouge). Selon que la particule est dans le premier puits ou le second, un 0 ou un 1 est mémorisé. Si la particule est en 0, on peut de façon réversible (donc sans coût en énergie) la déplacer en 1. De même, si elle est en 1, la laisser en 1 n'a aucun coût. En revanche, si l'on veut que, quelle que soit sa position initiale (pas forcément connue), elle se retrouve en 1 (réinitialisation), alors le processus (ci-contre) exige un minimum d'énergie. Quatre expériences concluant en faveur du principe de Landauer ont été menées depuis 2012 : à chaque fois, en s'y prenant au mieux, la réinitialisation exige un minimum d'énergie qui correspond à celui donné par le principe de Landauer ($kT \ln(2)$, T étant la température absolue et k la constante de Boltzmann).

montre avec une étonnante précision que depuis 1950, le doublement énoncé par l'Américain Jonathan Koomey s'est produit tous les 1,57 ans. Pour maintenir la vitesse de croissance de la puissance de calcul, il faudra évacuer de mieux en mieux une quantité de chaleur émise par des surfaces de plus en plus petites. Résoudre le problème force à envisager la fabrication de puces en 3D qui limitent les distances à parcourir par les courants électriques et donc l'échauffement provoqué par effet Joule. Une autre solution, nous le verrons, est de concevoir des puces réversibles.

Effacer un bit coûte un minimum d'énergie

Savoir s'il existe un minimum à l'énergie nécessaire pour effectuer des calculs est d'un intérêt pratique indubitable. Selon une hypothèse formulée en 1961 par le physicien américain Rolf Landauer [1927-1999], toute opération irréversible de calcul entraîne une dissipation de chaleur dans l'environnement. Calculer oblige à dépenser de l'énergie et produit un échauffement minimal. Ce n'est

guère étonnant et cela est conforme à la pratique. De la limite théorique de Landauer, on déduit que si nous continuons à fabriquer des puces irréversibles, la loi de Koomey cessera définitivement d'être vraie et nous serons bloqués. La validité du principe de Landauer est donc cruciale.

Une étude expérimentale de la dépense d'énergie minimale lors d'une opération de réinitialisation d'un seul bit d'information utilisant des mémoires nanométriques magnétiques a été menée en 2016 par Jeong-min Hong, de l'université de Californie à Berkeley, Brian Lambson, de la société Haynes & Boone à Palo Alto, et Jeffrey Bokor, du laboratoire américain Lawrence Berkeley. Cette technologie de stockage d'information étant aujourd'hui proche de celles couramment utilisées en informatique, les résultats obtenus concernent directement nos ordinateurs. Les chercheurs ont observé que la quantité d'énergie dissipée dans ce processus est conforme à la limite prévue par Landauer.

Partant d'une mémoire magnétique de un bit d'information dans un état 0 ou 1, une séquence d'applications de champs magnétiques remet la mémoire dans l'état 1.

Pour ces opérations, on utilise l'effet magnéto-optique Kerr, qui est un moyen de mémoriser des bits d'information en faisant interagir une intense onde électromagnétique, par exemple lumineuse, avec un matériau ferromagnétique. Après application de l'onde intense, la polarisation d'une onde envoyée sur le matériau et réfléchi est changée, ce qui inscrit une information binaire dans le matériau. Pour mesurer la quantité de chaleur diffusée, les chercheurs n'ont pas utilisé un seul point de stockage, mais un réseau de points identiques. Chaque point avait un diamètre de 0,1 micromètre, et était séparé de ses voisins de 0,4 micromètre. L'expérience, réalisée à diverses températures, a dégagé une quantité de chaleur un peu supérieure, mais proche de celle prévue par le principe de Landauer.

Aujourd'hui, les circuits microélectroniques les plus économes dépensent environ mille fois plus d'énergie que le minimum infranchissable indiqué par le principe de Landauer. Si les progrès continuent de suivre la loi de Koomey, nous y serons donc dans moins de 20 ans (voir la figure ci-dessous).

On s'approche de la barrière de Landauer

Le graphique ci-contre montre l'évolution récente de la consommation électrique pour une opération de calcul irréversible dans les circuits CMOS.

L'axe des ordonnées représente la consommation en 2012.

On voit sur le graphique que la courbe décroît linéairement : cela correspond à la loi de Koomey, qui stipule que le nombre d'opérations de calcul par joule dépensé double tous les 8 mois environ). Si cette progression régulière se poursuit, la courbe coupera la ligne horizontale pointillée – la barrière de Rolf Landauer – dans environ 20 ans. Puisque cette limite semble aujourd'hui infranchissable, la progression changera probablement d'allure : la courbe de consommation va se redresser et rester légèrement au-dessus de la ligne pointillée. Les données du graphique proviennent de R. Drechsler et R. Wille, « Reversible circuits : Recent accomplishments and future challenges for an emerging technology », dans H. Rahaman et al. (sous la dir.), *Progress in VLSI Design and Test*. Springer, pp. 383-392, 2012.



Le démon de Maxwell

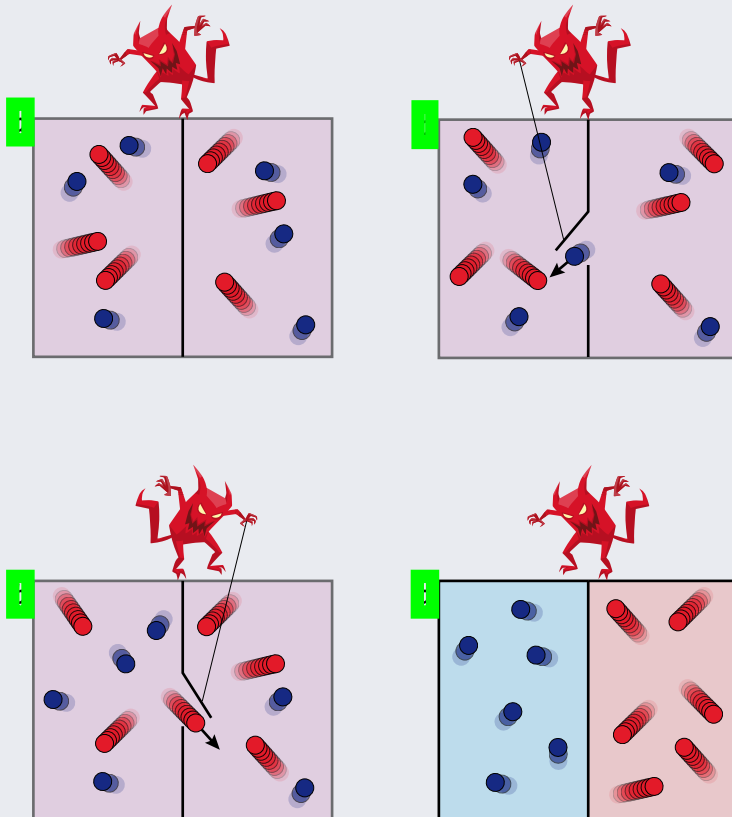
Le principe de Landauer formulé en 1961 affirme qu'il existe un lien étroit entre la théorie de l'information et la thermodynamique. Il indique que l'effacement de l'information ou toute opération élémentaire logique irréversible

est associée à une dissipation d'énergie (où k étant la constante de Boltzmann, T la température absolue).

Charles Bennett a utilisé ce principe pour résoudre le paradoxe du « démon de Maxwell ». Dans cette expérience de pensée, le démon observe les mouvements des molécules (a) et manipule une porte sans masse fonctionnant sans frottement entre deux compartiments d'un même réservoir, initialement à température uniforme. En ouvrant au bon moment la porte (b, c), il fait passer une à une les molécules les plus rapides du gaz (les molécules « chaudes », en rouge) d'un même côté, et les plus lentes (les molécules « froides », en bleu) de l'autre. Un compartiment devient alors plus chaud (d) que l'autre, puisqu'ils

contiennent les molécules les plus agitées. Cela semble contredire le second principe de la thermodynamique, puisqu'alors la différence de température entre les deux compartiments permettrait d'effectuer un travail.

La solution de Charles Bennett à ce paradoxe est qu'en décrivant le système, il faut prendre en compte la mémoire du démon. Celle-ci a dû être réinitialisée à chaque passage de molécule pour se retrouver dans son état initial, une réinitialisation qui a un coût énergétique. Les expériences récentes valident cette solution du paradoxe.



Revenons sur le principe de Landauer, longtemps controversé. Landauer a stipulé que l'irréversibilité logique est associée à l'irréversibilité physique et a émis l'hypothèse que l'effacement de l'information est un processus nécessairement dissipatif : oublier a un coût, et ce coût est impossible à éliminer. L'irréversibilité logique est l'impossibilité de revenir en arrière lors d'un calcul numérique ou logique. Par exemple, si l'on calcule le ET entre deux variables logiques A et B pouvant prendre les valeurs v (pour vrai) et f (pour faux), on a $v \text{ ET } v = v$, $v \text{ ET } f = f$, $f \text{ ET } v = f$, $f \text{ ET } f = f$. Il résulte que si l'on sait que le résultat de $\{A \text{ ET } B\}$ est f , on ne pourra pas retrouver A et B , qui pourraient être $\{A = v \text{ et } B = f\}$, $\{A = f \text{ et } B = v\}$ ou $\{A = f \text{ et } B = f\}$. Le calcul du ET est logiquement irréversible. Le OU est aussi logiquement irréversible, alors que le NON est réversible : la connaissance de $\text{NON } A$ donne A , car $\text{NON}(\text{NON } A) = A$.

Une barrière liée à l'irréversibilité

Landauer a affirmé que, lors d'une opération irréversible sur un bit d'information menée au sein d'un dispositif de mémoire plongé dans un environnement à une température absolue donnée T , au moins $kT \ln(2)$ joules de chaleur sont dissipés de la mémoire vers l'environnement (soit 3×10^{-21} joule à 300 kelvins ou 27 °C, la température ambiante). Dans cette formule, k est la constante de Boltzmann et $\ln(2)$ est le logarithme népérien de 2.

Aujourd'hui, dans la pratique, la barrière de Landauer n'est pas la principale raison de l'échauffement de nos puces et bien d'autres économies sont à mettre en œuvre avant de s'en préoccuper. Mais la science doit prévoir...

Notons que les expériences où l'on rencontre physiquement cette barrière de dissipation ne constituent pas des preuves définitives du principe de Landauer, car ne pas réussir à franchir une barrière ne prouve pas qu'elle soit infranchissable. De même qu'on ne démontrera pas qu'un objet matériel ne peut pas aller plus vite que la lumière en constatant qu'on n'y parvient pas, il sera impossible de prouver expérimentalement et définitivement le principe de Landauer.

Cependant, quand on a réduit toutes les causes identifiées d'échauffement et que l'échauffement mesuré reste supérieur et proche de celui prédit par le principe de Landauer, on ne peut que lui accorder plus de crédit.

L'expérience de 2016 confirme d'autres menées depuis quatre ans et qui toutes appuient le principe limitatif de Landauer.

Une microbille de verre et des lasers..

Le principe de Landauer a été testé pour la première fois en 2012 par Eric Lutz, de l'université d'Augsburg, en Allemagne, avec des collègues de l'École normale supérieure de Lyon (Antoine Bérut, Artak Arakelyan, Artyom Petrosyan, Sergio Ciliberto) et de l'université de Kaiserslautern (Raoul Dillenschneider). Leur dispositif, plus éloigné des dispositifs de calculs réels utilisés dans les microprocesseurs de l'expérience de 2016, consistait en une minuscule bille de verre plongée dans un liquide et qu'un faisceau laser piégeait dans un double puits de potentiel. Ce premier test avait été suivi par un autre en 2014 utilisant des particules plus petites. Une autre confirmation dans un cadre quantique a aussi été proposée en 2016 (voir la bibliographie).

Les résultats de ces quatre expériences montrent qu'il est possible d'approcher par des dispositifs adaptés la limite de Landauer, et qu'on pourra donc aussi le faire dans les futurs systèmes de calcul : aucune autre source de dissipation, comparable ou supérieure en taille et qui n'aurait pas été identifiée par les théoriciens, ne vient semble-t-il s'ajouter au coût minimal prévu par le principe de Landauer. Nous savons que nous buterons sur un obstacle presque certain.

Cependant, lorsque nous serons plus proches de la limite de Landauer, nous disposerons d'un autre moyen de calculer plus rapidement sans faire trop chauffer nos puces : le calcul réversible. En effet, si l'on accepte le principe de Landauer, seuls les calculs irréversibles sont intrinsèquement coûteux ; il faut donc s'arranger pour faire des circuits réversibles. Est-ce possible ?

L'idée des calculs logiques réversibles est due au logicien et anthropologue français

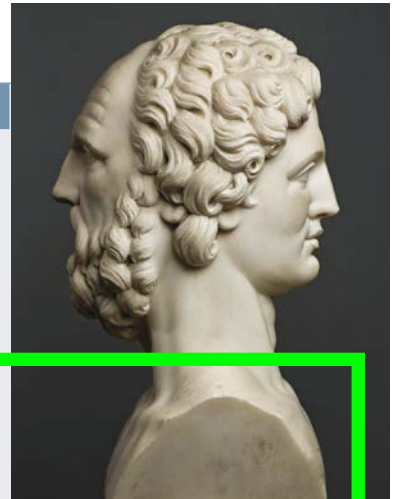
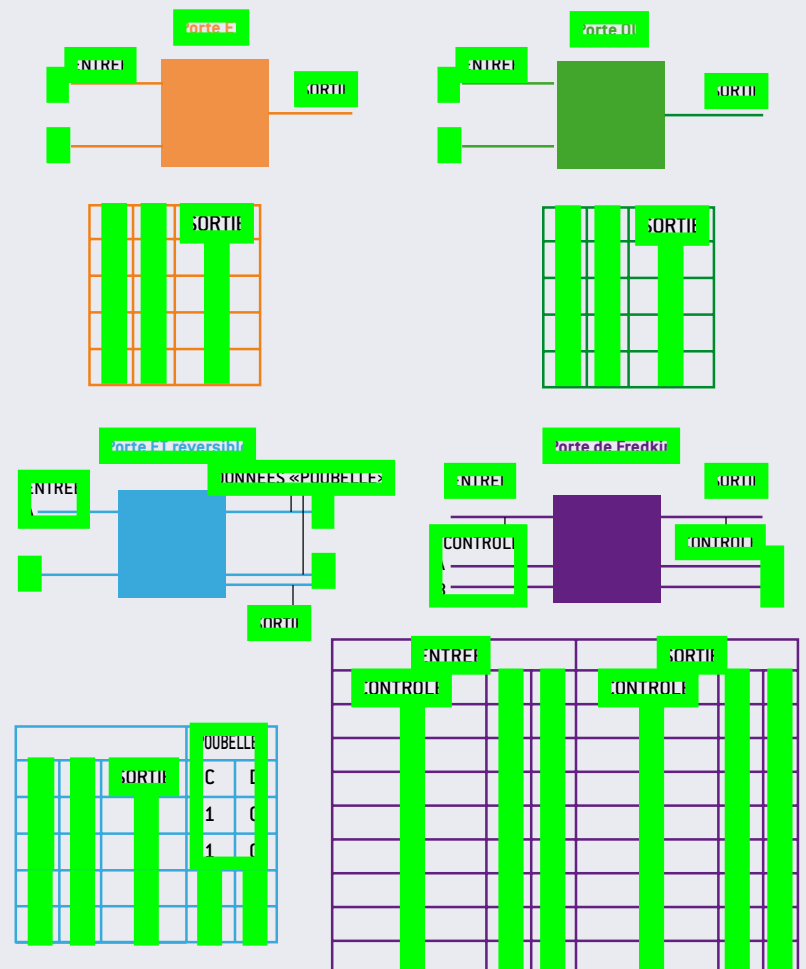
Portes réversibles

La porte logique ET n'est pas réversible, car, si l'on connaît le bit du résultat de $(A \text{ ET } B)$, on ne peut pas

le même de la porte logique OU (en vert).

Mais en ajoutant deux bits de sortie à la table du ET, on obtient un ET réversible (en bleu). La porte de Fredkin (en violet) est cependant plus pratique pour réaliser des circuits réversibles. Elle comporte trois bits en entrée. Le bit supplémentaire est un bit de « contrôle » : s'il vaut 0, les bits A et B restent identiques en sortie ; s'il vaut 1, les valeurs de A et B sont, en sortie, échangées.

On sait aujourd'hui concevoir des puces réversibles, ainsi que des langages de programmation ne produisant que des programmes réversibles. L'un des plus anciens est le langage *Reversible* qui doit son nom au dieu romain à deux visages, un pour chaque sens.



Entropie et observation

L'entropie en thermodynamique est une grandeur associée à un macroétat, c'est-à-dire à un ensemble de configurations microscopiques (microétats) possibles pour un observateur qui ne connaît pas le détail des positions de ces microétats. Par exemple, le volume occupé par un gaz, informations insuffisantes pour déterminer la position et la vitesse de chaque molécule. L'entropie est une fonction croissante du nombre de microétats compatibles avec le macroétat.

En effectuant des mesures sur un système, un observateur diminue l'entropie, car ces mesures restreignent le nombre de microétats compatibles ; or cela semble contredire le second principe de la thermodynamique. Pour éviter cette contradiction, Wojciech Zurek, du laboratoire américain de Los Alamos, considère que lors d'une opération de mesure, il faut mener l'analyse de l'évolution de l'entropie en prenant en compte l'ensemble (système observé + observateur).

L'entropie du système observé est l'entropie classique en thermodynamique, et celle de l'observateur est l'entropie algorithmique de sa mémoire, définie par

la taille du plus petit programme qui engendre les données de cette mémoire lors d'une opération de mesure.

L'entropie du système observé diminue, tandis que l'entropie algorithmique de la mémoire de l'observateur augmente. Les deux se compensent et le tout n'est donc pas sujet à une diminution d'entropie, conformément à ce qu'affirme le second principe, selon lequel l'entropie ne peut pas diminuer. Bien sûr, si ensuite l'observateur efface sa mémoire pour la rétablir dans son état initial d'avant l'observation, cela engendre d'après le principe de Landauer une augmentation de l'entropie de l'ensemble système-observateur-environnement. L'idée de Landauer et celle de Zurek produisent donc une conception cohérente de l'évolution de l'entropie lors d'une mesure conforme au second principe de la thermodynamique.



Yves Lecerf, disparu en 1995. En effet, ce dernier proposa en 1963 un modèle de machine de Turing (c'est-à-dire abstrait) réversible. Comme tout calcul peut être effectué avec une machine de Turing, lorsqu'on fait un calcul, quel qu'il soit, il existe une façon de le mener de manière logiquement réversible avec cette machine. Lorsque la machine réversible exécute son calcul en passant d'un état initial A à un état B, elle le fait de telle façon que, partant de B, on peut la faire fonctionner en arrière et revenir à A : rien n'a été oublié lors du calcul et tout peut donc être « défait ».

Le résultat de Lecerf est fondamental et signifie qu'en s'y prenant bien et en gardant suffisamment d'informations sur le calcul pendant qu'il se déroule (grâce à des

variables supplémentaires introduites à cette fin), on pourra reprendre le chemin inverse. Lecerf ignorait les travaux de Landauer et n'a pas poursuivi ses recherches sur le sujet. Son travail fondamental n'a été redécouvert que plus tard.

En 1973, Charles Bennett, chercheur chez IBM, montra que l'on pouvait concevoir des machines à calculer générales, à la fois logiquement réversibles (comme celles de Lecerf) et thermodynamiquement réversibles. Par conséquent, à chaque fois que l'on programme un calcul, il est possible en théorie de le réaliser physiquement de manière réversible. Si l'on accepte la validité du principe de Landauer, on pourra donc réaliser tout calcul à un coût énergétique aussi faible que souhaité.

En 1982, Edward Fredkin et Tommaso Toffoli, au MIT aux États-Unis, introduisirent un modèle de calculateurs n'utilisant que des boules de billard. Ce modèle théorique est physiquement réversible, mais il est inutilisable en pratique, puisqu'il faudrait pour le faire fonctionner réussir à placer et lancer un grand nombre de boules de billard de façon extrêmement précise, et d'autant plus précise que le calcul est long. Un autre modèle théorique d'ordinateur réversible, utilisant le mouvement brownien, fut proposé dans la foulée par Charles Bennett, mais là encore sans qu'il soit envisageable d'en fabriquer des versions utilisables... du moins pour l'instant (voir http://www.nld.ds.mpg.de/~bioentropy/material/Bennett_1982.pdf).

Depuis, l'étude du calcul réversible a largement progressé et est devenue un sujet de recherche fondamentale. Un congrès annuel lui est consacré depuis une dizaine d'années, et plus personne ne doute qu'il faudra un jour passer par le calcul réversible pour que les performances des ordinateurs continuent à s'améliorer. Cette importance à venir du calcul réversible est d'autant plus probable que la mécanique quantique propose naturellement des modèles de calcul réversible. Si les ordinateurs quantiques doivent un jour remplacer nos ordinateurs classiques, alors le calcul réversible sera au centre des méthodes pour les concevoir et les programmer.

Informatique réversible : des recherches en cours

Mentionnons quelques thèmes de travaux.

a) Bien sûr, on perfectionne les modèles théoriques de machines réversibles dont on cherche à comprendre la complexité des opérations, que l'on compare aux opérations non réversibles. Mener des calculs réversibles oblige à gérer plus d'informations, et pour cela on peut s'y prendre plus ou moins bien. Charles Bennett avait démontré dès 1989 qu'une machine de Turing non réversible utilisant T étapes de calcul et S unités de mémoire peut être simulée par une machine de Turing réversible utilisant $T + \epsilon$ étapes de calcul et $S \log(T)$ mémoires, où ϵ est un nombre réel strictement

posatif que l'on peut choisir. Préciser et affiner les méthodes de transformation pour obtenir de telles machines réversibles pouvant se substituer aux machines non réversibles, en limitant le coût en temps et en mémoire, est bien évidemment essentiel pour que le calcul réversible soit utilisable avec efficacité.

b/ La transformation automatique de programmes non réversibles en programmes réversibles est possible, mais ces transformations ne doivent pas être menées trop brutalement. Il y a sur ce thème une multitude de progrès à faire en considérant des méthodes adaptées à des classes particulières de programmes.

c/ Pour faciliter l'écriture de programmes réversibles, on conçoit des langages de programmation de haut niveau avec des compilateurs associés qui produisent automatiquement des versions réversibles des programmes qu'on écrit. En particulier, on a développé des compilateurs de ce type pour le langage C. Un langage dénommé Janus, en l'honneur du dieu romain à deux visages, a été proposé dès 1986 : il est à la fois compact et puissant, puisqu'on peut, en quelques dizaines de lignes, programmer une machine de Turing universelle.

d/ Plutôt que de programmer sans s'occuper de la réversibilité, puis de confier à un outil le soin de transformer le programme, il est plus efficace de concevoir directement des programmes réversibles. Pour des applications particulières, ces derniers optimiseront au mieux les temps de calcul et le volume de mémoire nécessaire à leur fonctionnement. De nombreux systèmes de codage (par exemple de compression sans pertes, ou en cryptographie) sont logiquement réversibles, tout simplement parce qu'il faut pouvoir décoder ce qu'on a codé. Aujourd'hui, ils ne sont pas programmés de manière réversible : on utilise par exemple des ET des OU, qui ne sont pas réversibles, et donc même si la transformation correspondant au codage est globalement réversible, ce qui est calculé lors du déroulement du programme ne l'est pas. Repenser ces programmes pour qu'ils soient réversibles est sans doute la meilleure façon de procéder. C'est

important, car ce type de programmes est d'usage très courant.

e/ Tous les types de programmes, dont ceux par exemple destinés à la génération de suites pseudoaléatoires ou ceux utilisant de nombreuses opérations arithmétiques, sont l'objet d'études particulières pour développer les bonnes méthodes qui en produiront des versions réversibles.

f/ Les portes logiques réversibles, les circuits réversibles, la synthèse et l'optimisation de circuits réversibles sont maintenant assez bien compris et maîtrisés, même si les surcoûts créés par la réversibilité restent importants et ennuyeux pour les circuits complexes.

g/ Des puces dotées de jeux d'instructions réversibles sont étudiées et perfectionnées.

h/ Enfin, l'utilisation de modèle de calculs quantiques réversibles est l'objet d'attentions et de recherches dont l'aboutissement concret, même s'il n'est pas immédiat, pourrait devenir la solution pour perpétuer le rythme de progrès de nos machines.

Derniers doutes ?

signalons quand même que certains théoriciens, physiciens ou philosophes des sciences, ont longtemps refusé d'admettre le principe de Landauer. Ils ont parfois prétendu qu'il n'y avait pas de minimum de dépense lors des opérations logiquement irréversibles. Dans le cas de l'ordinateur à mouvement brownien, on a aussi argumenté qu'il y avait bien d'autres dépenses inévitables. Parfois encore, c'est l'idée d'un lien entre réversibilité thermodynamique et la réversibilité logique qui est apparue inconcevable ou même absurde. Des reformulations du principe de Landauer ont été proposées, par exemple par Charles Bennett, pour éviter ces critiques.

Quelles seront les réactions des sceptiques face aux récentes expérimentations qui soutiennent le principe de Landauer ? Même si des discussions se poursuivront pour formuler le plus soigneusement possible ces questions délicates, le lien entre réversibilité logique et thermodynamique est avéré et l'informatique réversible sera un instrument de progrès pour les ordinateurs futurs.

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE
est professeur émérite à l'université de Lille et chercheur

au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISTAL)

BIBLIOGRAPHIE

J. Hong *et al.*, Experimental test of Landauer's principle in single-bit operations on nanomagnetic memory bits, *Science Advances*, vol. 2(3), e1501492, 2016.

J. P. S. Peterson *et al.*, Experimental demonstration of information to energy conversion in a quantum system at the Landauer limit, *Proc. R. Soc. A*, vol. 472(2188), avril 2016.

Y. Jun *et al.*, High-precision test of Landauer's principle in a feedback trap, *Physical Review Letters*, vol. 113, 190601, 2014.

K. Perumalla, *Introduction to reversible computing*, CRC Press, 2013.

A. Bérut *et al.*, Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics, *Nature*, vol. 483, pp. 187-189, 2012.

P. Uzan, Physique, information statistique et complexité algorithmique, *Philosophia scientiae*, vol. 11-2, 2007 (<https://philosophiascientiae.revues.org/347#text>).



Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Un sommeil de glace

Pour traverser la Galaxie sans avoir à supporter de longs et ennuyeux voyages, rien n'égale le sommeil cryogénique. En refroidissant le corps, on en ralentit le métabolisme – un principe qui a des applications médicales.

Roland LEHOUCQ et Jean-Sébastien STEYER – Illustration : Marc BOULAY

Dans l'innombrables œuvres de fiction invoquent un procédé qui interrompt temporairement la vie avant de la relancer. Si la sorcière de *Blanche Neige*, publiée en 1812 par les frères Grimm, utilise plutôt la magie pour plonger l'héroïne dans le sommeil artificiel, les histoires plus récentes sont dans un registre plus technique. Ainsi, dans *Star Wars : L'Empire contre-attaque* (Irvin Kershner, 1980), Han Solo est congelé dans du carbonite, un matériau fictif, avant d'être remis au chasseur de primes Boba Fett.

Dans le louable souci de leur éviter l'ennui d'un interminable voyage interstellaire, les protagonistes de *La Planète des singes* (Franklin Schaffner, 1968), d'*Alien* (Ridley Scott, 1979) ou d'*Avatar* (James Cameron, 2009) sont eux aussi plongés en « animation suspendue », aussi nommée « stase » ou « sommeil cryogénique ». Comme le suggère cette dernière expression, il semble que, pour atteindre cet état, la température corporelle ait diminué au point que les fonctions métaboliques sont presque à l'arrêt.

Le refroidissement est sans doute la technique la plus utilisée dans les œuvres de fiction. *Hibernatus* (1969), d'Édouard Molinaro, raconte l'histoire d'un individu congelé vivant et réanimé soixante-cinq ans après, situation que l'on retrouve dans l'album *Le Savant fou*, de Tardi (1977), où une poignée de scientifiques ramènent à la vie un pithécantrophe conservé dans une banque de tourbe gelée provenant de Sibé-



DANS LE FILM PASSENGERS

Morten Tyldum, 2016), les deux héros se réveillent de leur sommeil cryogénique trente ans après avoir été endormis, alors que le voyage est loin d'être terminé...

rie. La congélation permet une sorte de voyage dans le futur, comme dans le film *Demolition Man* (Marco Brambilla, 1993), où les criminels sont condamnés à une longue peine d'hibernation dans un cryo-bénéficiaire.

Il est bien connu que le froid préserve les aliments en ralentissant les réactions chimiques de décomposition ainsi que l'activité et la prolifération de microorganismes. Mais peut-on utiliser cette technique sur un humain ? L'idée d'utiliser le froid pour induire une animation suspendue de l'organisme n'est pas récente. Ainsi, Hipocrate (460-370 avant notre ère) suggérait de placer les soldats blessés dans la neige pour les maintenir en vie. En outre, la médecine a relevé quelques cas de personnes tombées dans des eaux glacées mais que l'on a pu réanimer, bien que leur cœur se soit arrêté.

Toujours en médecine, on utilise l'hypothermie induite et contrôlée pour ralentir le métabolisme de l'organisme (ou d'un organe particulier) et lui permettre ainsi de mieux résister à un manque d'oxygène. Par exemple, certaines opérations cardiaques nécessitent d'arrêter le flux sanguin pendant le travail du chirurgien. À température normale, les cellules nerveuses ne survivent que quelques minutes sans l'apport d'oxygène du sang. Au-delà, le cerveau subit des lésions irréversibles et le sujet meurt.

Le chirurgien utilise donc la technique dite de cardioplegie froide, qui consiste à



LA CRYOGENISATION CONSISTE

à préserver le corps à très basse température, souvent dans l'espoir d'un futur où sa maladie, aujourd'hui incurable, aura un traitement. Cette idée semble relever de la science-fiction, mais que nous réserve vraiment l'avenir ?

Installer une circulation sanguine extra-corporelle et à refroidir le cœur à moins de 35 °C. On peut alors l'arrêter et l'opérer. Avec le réchauffement de cet organe, en fin d'intervention, les battements cardiaques reprennent en général. Samuel Tisherman a testé une technique encore plus extrême à l'hôpital de Pittsburgh. Il a montré qu'en refroidissant le corps jusqu'à 10 °C grâce à une solution physiologique introduite dans le réseau sanguin, on peut stopper la circulation durant une trentaine de minutes. Cette technique n'est pas sans risques, car, à basse température, la coagulation ne se fait quasiment plus.

La congélation des tissus est encore plus problématique. Si l'on sait conserver à très basse température de petites quantités de matière organique vivante, du sperme ou des cellules souches par exemple, on en est loin pour des organes ou des corps entiers. En effet, quand des tissus sont gelés, des cristaux de glace se forment à l'intérieur des cellules. La glace occupant plus de volume que l'eau liquide, les cristaux intracellulaires finissent par détruire les parois de la cellule. On constate aisément ce phénomène lors de la décongélation d'un steak : une fois revenue à température ambiante, la viande libère un « jus » qui n'est rien d'autre que du liquide intracellulaire.

Certains organismes vivants se sont adaptés à des conditions climatiques rigoureuses. Ainsi, les poissons des glaces du pôle Nord, les notothenioïdes vivent dans les

eaux froides de l'Antarctique. Ils sont capables de vivre à des températures corporelles qui descendent parfois à -6 °C, car leur foie sécrète des protéines antigels. En enrobant les microcristaux de glace qui se forment dans le sang, ces protéines les empêchent de croître, ce qui protège l'animal de la congélation. À l'inverse, certaines grenouilles soumises au climat glacial de l'Alaska restent entièrement gelées pendant deux mois avant de se réveiller quand le climat s'y prête. Leurs organes résistent à l'apparition de lésions fatales grâce au sang de ces amphibiens qui contient un taux élevé de glucose, d'urée et de glycolipides, des antigels naturels.

Un marchand de sommeil cryogénique

Les difficultés n'ont pas empêché de vendre le « miracle » de la cryogénisation des corps pour conjurer la mort. L'universitaire américain Robert Ettinger a popularisé cette idée dans son livre *La Perspective de l'immortalité* publié en 1962. En 1976, il a fondé l'institut Cryonics, où son corps, ainsi que celui de plus de deux cents personnes, est conservé *post mortem* à -196 °C dans l'attente d'une résurrection hypothétique.

En attendant que la technique rende éventuellement réversible la cryoconservation des corps vivants, des progrès non cryogéniques ont porté sur l'animation suspendue de mammifères qui n'hibernent

pas naturellement, tels que les souris ou les chiens.

En 2005, des chercheurs de l'université de Pittsburgh ont réussi à ramener des chiens à la vie après avoir remplacé leur sang par une solution glacée spéciale. Cliniquement morts durant trois heures, les chiens ont été réanimés une fois leur cœur relancé.

Mark Roth, biochimiste de l'université de Washington à Seattle, a utilisé du sulfure d'hydrogène, gaz considéré comme un poison. Il a montré que des souris inhalant durant quelques minutes une faible dose de sulfure d'hydrogène (80 parties par million) perdent connaissance. Leur température chute de 37 à 25 °C et leur rythme respiratoire ralentit jusqu'à moins de 10 respirations par minute (au lieu de 120). Leur métabolisme ralentit et leurs cellules consomment alors moins d'oxygène. Exposées à un air normal après six heures, les souris se sont réveillées en bonne santé.

Dans le futur, ces techniques seront peut-être appliquées à des humains impliqués dans un grave accident, de façon à figer leur état le temps de préparer l'intervention médicale qui leur sauvera la vie. Mais l'application à des astronautes en partance pour une planète lointaine n'est sans doute pas pour demain...

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Jean-Sébastien STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. Marc BOULAY est sculpteur numérique.

ART & SCIENCE

Les données, objets d'art

Les mégadonnées, ou big data, sont devenues un eldorado pour les acteurs scientifiques, politiques, commerciaux... Les artistes s'en emparent aussi. Certains en font un instrument de dénonciation et invitent à nous interroger sur la place qu'il convient de donner à ces flots d'informations.

Loïc MANGIN

Aujourd'hui, dans de nombreux domaines, l'enjeu est d'exploiter de gigantesques flots de données afin d'en tirer des informations. Par exemple, en 2008, l'équipe de Barack Obama a analysé quantité d'informations pour mieux cerner les opinions politiques des citoyens américains. Nous sommes bel et bien dans l'ère des données massives.

Pour s'y retrouver, on compte sur des algorithmes toujours plus complexes. Cependant, selon l'historien Denis Peschanski, si l'on se contentait des corrélations mises en évidence, sans chercher les liens de causalité et les concepts pertinents, cette association entre données et algorithmes signerait la fin de la théorie. Comment sortir de cette impasse ? Peut-être en recourant à la datavisualisation, c'est-à-dire à la mise en image des informations. On peut alors réfléchir, questionner les données et aller au-delà des corrélations : le regard se fait critique. De fait, on observe un engouement pour la datavisualisation. C'est l'objet de l'exposition *Données à voir* au lieu nommé « La Terrasse : espace d'art de Nanterre », dans les Hauts-de-Seine.

La datavisualisation n'est pas récente. Dès 1869, Charles Joseph Minard, inspecteur général des ponts et chaussées à la retraite, proposa une représentation graphique synthétique du trajet et de l'effectif des armées napoléoniennes lors de la campagne de Russie (1812-1813) ainsi que de la température lors de la retraite.

Près d'un siècle plus tard, au moment des mouvements de contestation des années 1960, la représentation des données, des relations et des pouvoirs a séduit les artistes engagés politiquement. C'est à cette époque qu'ont travaillé notamment Öyvind Fahlström (1928-1979) et Mark Lombardi (1951-2000).

Le premier, Suédois né au Brésil, fut tour à tour poète, journaliste, cinéaste, peintre... Pour sa série *Column* [a], il élabore des maps-mondes très colorées qui mettent en évidence les intérêts économiques américains à travers le monde. Les données figurées sont statistiques, économiques, géopolitiques...

Si l'on se contentait des corrélations mises en évidence, l'association entre données et algorithmes signerait la fin de la théorie

Elles sont présentées selon le code couleur suivant : en bleu les États-Unis, en violet l'Europe, du rouge au jaune les pays socialistes et du vert au marron les « pays du tiers-monde », comme on disait à l'époque. Le bleu dominant de l'œuvre, Öyvind Fahlström dénonçait ainsi l'impérialisme américain.

L'Américain Mark Lombardi pratiquait aussi la datavisualisation sans ordinateur. Dans les années 1990, il rédigea plusieurs milliers de fiches de renseignement sur la base d'informations publiques et élaborait des diagrammes en réseau révélant les structures du pouvoir politicoéconomique. Ainsi, *Indian*

Spring State Bank [b] met en évidence les liens entre une banque, la mafia et l'affaire Iran-Contra, ou Irangate (des membres de l'administration Reagan ont vendu illégalement des armes à l'Iran pour financer secrètement des opposants au gouvernement sandiniste du Nicaragua). De son côté, avec *Addendum* de Alfred Barr [c], l'Américain Ward Shelley propose une chronologie des mouvements artistiques qui l'ont influencé.

Dernier exemple, le Tunisien Ali Tnani présente *Data Trails* [d], conçu avec le Suisse Lukas Truniger. Le point de départ est l'apparition soudaine du lac de Gafsa, au sud de la Tunisie, dès 2003. Ce lac devint célèbre en 2014 et l'on parla alors de miracle pour cette région sinistrée : le site s'est mué en une sorte de station balnéaire. Le rêve fut bref, car on découvrit que l'eau, surgie à proximité d'anciennes mines de phosphate, est très polluée. L'installation

tient compte de ce désenchantement à partir des divers articles publiés sur Internet, dont les mots sont redistribués selon les motifs qui se succèdent sur un écran.

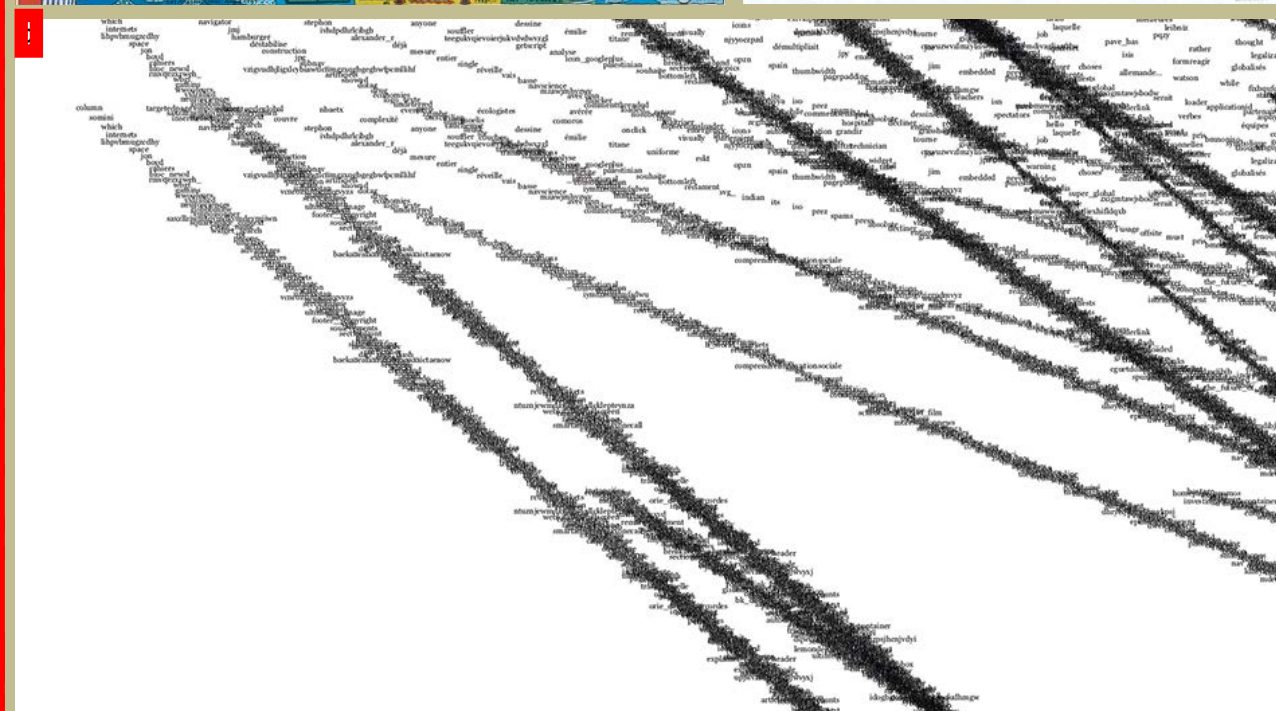
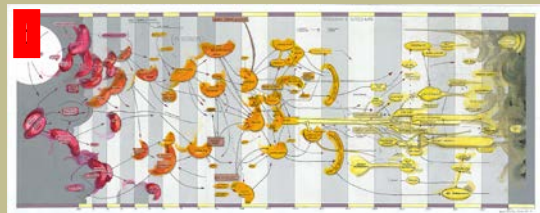
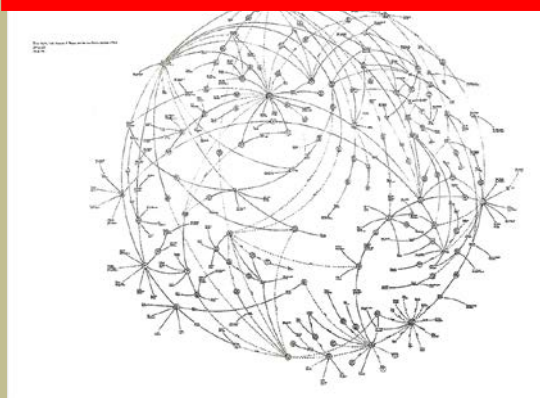
Les artistes ont donc fait des données un matériau à part entière. Un matériau complexe qui émane de l'ensemble de la société et qui irrigue en retour. Bien mises en images, on peut en faire l'instrument d'une nouvelle citoyenneté, voire, à en croire Gilles Deleuze, d'un nouveau modèle de vérité. ■

Données à voir, La Terrasse : espace d'art de Nanterre, du 7 octobre au 23 décembre 2016. Pour plus d'informations : www.nanterre.fr



Quel est le matériau principal de ces œuvres ? La peinture ? L'encre ? Non, il s'agit de données, publiques ou privées, que les artistes interprètent et offrent au regard pour mieux faire ressortir un message ou une information : *Column* par Øyvind Fahlström (a), *Indian Springs State Bank* par Mark Lombardi (b), *Addendum to Alfred Barr* par Wald Schelley (c) et *Data Trails* par Ali Tnani et Lukas Truniger (d).

b



OFFRE DÉCOUVERTE

ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE



1 AN - 12 N^{os}
59€

24%
ÉCONOMIE

2 ANS - 24 N^{os}
110€

29%
ÉCONOMIE

3 ANS - 36 N^{os}
159€

32%
ÉCONOMIE

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À renvoyer accompagné de votre règlement à **POUR LA SCIENCE - Service abonnements - 19 rue de la Minerve - 35400 VITRÉ - 02 99 00 53 67 / 402 111 kircb cedex**

☒ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en formule Découverte**

☐ 1 an • 12 numéros • **59€** au lieu de 78,50€ (D1A59E)

☐ 2 ans • 24 numéros • **110€** au lieu de 157€ (D2A110E)

☐ 3 ans • 36 numéros • **159€** au lieu de 235,50€ (D3A159E)

VOS COORDONNÉES

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____
Pays : _____

VOTRE MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire

☐ Par virement bancaire

Signature obligatoire



Mon e-mail pour recevoir la newsletter Pour la Science (à remplir en minuscule) _____@_____

Grâce à votre email, nous pourrions vous contacter si besoin pour le suivi de votre abonnement. À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passez ce délai, merci d'en faire la demande à pourlascience@abopress.fr.

Je souhaite recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

Éclair de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Votre réserve aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/01/17 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et Libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science.

IDÉES DE PHYSIQUE

Le doigt, un capteur universel

Pour reconnaître un matériau du bout des doigts, il ne suffit pas d'appuyer dessus. Il faut aussi balayer la surface : grâce aux frottements, des vibrations porteuses d'informations sont engendrées.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Le seul sens du toucher nous permet d'identifier avec les doigts la matière d'un objet, qu'il soit solide comme la soie, le bois, le coton ou le papier, ou liquide comme l'huile d'olive ou le miel. D'où provient cette capacité sensorielle qui interpelle biologistes et physiciens, et fait rêver les roboticiens en quête d'une peau artificielle ? De la présence dans la peau de plusieurs types de terminaisons nerveuses, d'une imbrication du derme et de l'épiderme, et du rôle essentiel des empreintes digitales. Muni de cette structure et de cet arsenal de capteurs, le doigt détecte simultanément la température, la pression, le cisaillement, le relief, les vibrations ou encore la texture. Un capteur très polyvalent !

Chaud et froid, pression..

Lorsque nous touchons un objet avec nos doigts. Une première information que notre cerveau élabore à partir des signaux transmis par les terminaisons nerveuses libres de la peau est la sensation de chaud et de froid. Il s'agit d'une information cruciale, car deux matériaux ayant la même température peuvent provoquer des sensations différentes : par exemple, nous percevons le bois comme chaud et le métal comme froid.

En réalité, nous sommes sensibles à la rapidité du transfert thermique entre notre peau et le matériau et à la variation

de température qui en résulte. Cela traduit la « effusivité » du matériau, propriété qui combine sa conductivité thermique et sa capacité calorifique.

Par ailleurs, cette sensation de chaud ou froid nous renseigne aussi sur la rugosité du matériau. En effet, la surface de contact avec le doigt étant plus faible lorsque le matériau est rugueux plutôt que lisse, le transfert thermique est moins efficace : la surface paraît donc plus chaude. Cette sensation diminue cependant lorsque nous appuyons un peu plus avec le doigt, puisque la surface de contact augmente, grâce à l'élasticité de la peau.

Simultanément, nos doigts perçoivent les forces engendrées par l'enfoncement de la peau. La détection de ces pressions localisées, et par là-même l'identification des déformations spatiales de la surface, est possible grâce aux « disques de Merkel », des terminaisons nerveuses spécialisées.

La sensibilité des disques de Merkel et leur haute résolution spatiale sont optimisées par leur localisation, à la frontière entre le derme et l'épiderme. Cette frontière n'est pas plane, mais au contraire fortement ondulée. Le derme et l'épiderme ayant des élasticités différentes, les contraintes mécaniques présentes à ce niveau sont beaucoup moins uniformes qu'avec une interface plane. Elles ont tendance à se concentrer dans les zones les plus incurvées de la frontière, où le stimulus (la pression), ainsi amplifié, donnera un signal nerveux plus fort.

Les disques de Merkel ont un temps de réponse relativement long, adapté aux pressions continues. Ils sont complétés par les « corpuscules de Meissner », capteurs sensibles aux variations rapides du stimulus.

En pratique, le nombre et la disposition des disques de Merkel sont tels qu'ils nous informent sur des rugosités d'échelle supérieure à quelques dixièmes de millimètre. C'est largement suffisant pour lire le braille (les points des caractères ont une taille supérieure au millimètre) et pour identifier du papier de verre à gros grains. En revanche, lorsque la rugosité est plus fine, la résolution spatiale devient insuffisante : nous sommes incapables de distinguer, par une simple pression du doigt, des papiers de verre à grains fins mais différents.

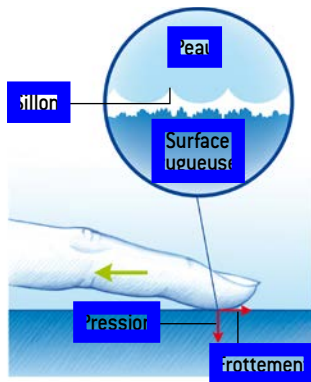
Comment faire dans ce cas ? Nous savons d'expérience qu'il convient alors de



LORSQU'ON TOUCHE AVEC LES DOIGTS une surface, la peau envoie au cerveau une multitude d'informations qui permettent d'identifier le matériau.

QUAND LE DOIGT BALAYE LA SURFACE

Lorsqu'un objet, une force de frottement s'exerce. Des vibrations sont ainsi engendrées, dont la fréquence dépend de la vitesse de balayage, de la taille caractéristique des aspérités de la surface et de l'écart entre deux sillons de l'empreinte digitale.



LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilogs.fr/dees-de-physique

Frotter la surface avec le doigt. En procédant ainsi, nous percevons tout d'abord l'intensité de la force de frottement. Cette force, parallèle aux surfaces en contact, engendre dans la peau des contraintes d'étirement et de cisaillement que détectent les « corpuscules de Ruffini », situés dans la profondeur du derme.

Cependant, le frottement en jeu n'est pas celui, habituel, qui s'exerce entre deux solides. Ce dernier dépend de la force pressante appliquée, mais pas de l'aire de contact (il s'agit des lois de Coulomb). Or avec le doigt, le frottement est du même type qu'avec du caoutchouc, c'est-à-dire que la force de frottement dépend de cette aire.

Cette différence est due au caractère élastique de la peau. Entre deux solides, à cause de la rugosité, le contact se limite en réalité à quelques points. La peau, elle, peut mieux épouser les rugosités micrométriques de la surface du matériau et assurer ainsi un contact beaucoup plus complet.

En outre, les mesures ont montré que lorsque le glissement commence, la force de frottement diminue ; et qu'au cours du glissement, cette dernière n'est pas constante, mais fluctue. Les caractéristiques détaillées de ces phénomènes dépendent de la rugosité des surfaces. Ce sont là aussi des informations que le cerveau peut exploiter.

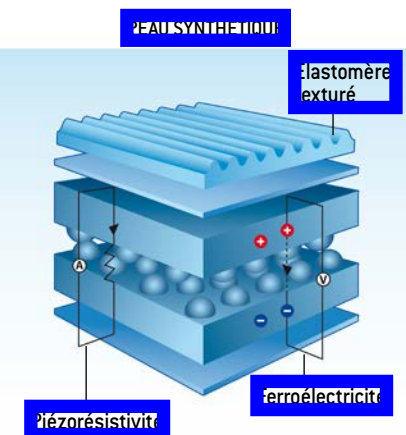
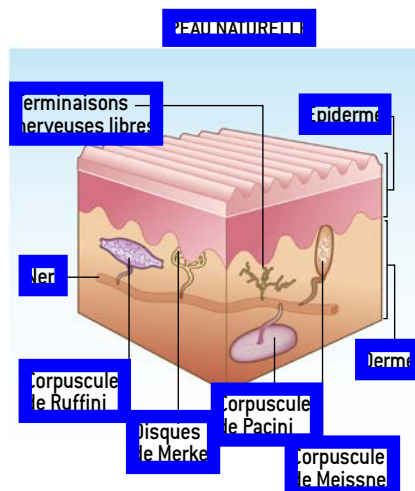
Lorsque notre doigt balaye une surface, nos sensations dépendent crucialement de nos empreintes digitales. D'une part, ces dernières augmentent l'élasticité moyenne de la surface de la peau, en la rendant davantage déformable. D'autre part, elles engendrent, lors du glissement, des vibrations grâce auxquelles nous percevons les textures fines. En effet, lorsque le doigt se déplace, les plis de l'empreinte digitale suivent les creux et bosses de la surface et ce mouvement relatif engendre des vibrations.

Des vibrations de haute fréquence

La fréquence de ces vibrations dépend du type de rugosité. Si celle-ci est d'échelle supérieure à celle des empreintes digitales, la fréquence des vibrations est le rapport entre la vitesse de déplacement et la distance (un demi-millimètre environ) entre deux sillons consécutifs. Sinon, c'est l'échelle caractéristique de la rugosité qui intervient. Lorsque cette échelle est comparable à l'écart entre sillons, les vibrations sont amplifiées. Dans ce cas, pour des vitesses ordinaires de glissement du doigt

EN S'INSPIRANT DE LA STRUCTURE

de la peau naturelle (à gauche), les chercheurs sud-coréens ont réalisé un prototype de peau synthétique (à droite) sensible à la température, à la pression ainsi qu'aux variations rapides de cette dernière.



On obtient des fréquences de l'ordre de quelques centaines de hertz. Cela correspond à l'optimum de sensibilité des « corpuscules de Pacini ». Ces terminaisons nerveuses détectent en effet les vibrations de haute fréquence et les accélérations de la déformation de la peau, particulièrement présentes au début et à la fin du toucher. Leur résolution spatiale est en revanche très faible.

En s'inspirant de tous ces capteurs sensoriels, Jonghwa Park et ses collègues, des chercheurs sud-coréens, ont récemment conçu un prototype de peau artificielle capable de détecter les vibrations acoustiques, les coups et la température du bras, et de distinguer différentes textures.

Leur dispositif [voir l'illustration page précédente, en bas] reprend les principales caractéristiques morphologiques de la peau

et comporte notamment deux réseaux de microdômes se faisant face, faits d'un matériau composite souple ayant des propriétés ferroélectriques et piézoélectriques.

La piézorésistivité (variation de la résistance électrique en fonction de la pression), accentuée par le contact plus ou moins étendu entre les deux réseaux de microdômes, permet de détecter la pression statique. Quant à la ferroélectricité (existence d'une polarité électrique spontanée, qui dépend notamment de la température et de la pression), elle permet de détecter la température et des variations de pression.

Les applications envisagées seraient des peaux synthétiques pour robots sensibles, mais aussi de nouveaux outils médicaux, par exemple des dispositifs portables de suivi de la température corporelle et de la pression artérielle.

BIBLIOGRAPHIE

J. Park *et al.*, Fingertip skin-inspired microstructured ferroelectric skins discriminate static/dynamic pressure and temperature stimuli, *Science Advances*, vol. 1(9), article e1500661, 2015.

J. Scheibert *et al.*, The role of fingerprints in the coding of tactile information probed with a biomimetic sensor, *Science*, vol. 323, pp. 1503-1506, 2009.



retrouvez la rubrique données de physique sur www.pourlascience.fr

Toutes les archives



Pour la Science
Dossier
Pour la Science
1996

Disponibles sur www.pourlascience.fr

Numéros à lire en ligne ou à télécharger au format PDF

QUESTION AUX EXPERTS

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

La clé de l'énigme réside dans l'âge fini de l'Univers et dans le fait que les étoiles ne brillent pas éternellement.

Karen KWITTER



L'Univers semble statique. Dans toutes les directions, des astres distants nous envoient de la lumière. Dès lors, pourquoi leurs signaux ajoutés ne rendent-ils pas la voûte céleste brillante la nuit ? Cette question intrigue les astronomes depuis longtemps. Elle constitue le « paradoxe d'Olbers », car elle a été posée pour la première fois par l'astronome allemand Heinrich Olbers en 1823.

Olbers a formulé son paradoxe en ces termes : si l'on suppose que l'Univers est infini et qu'il contient une infinité d'étoiles (ou de galaxies) uniformément réparties, alors chaque direction d'observation devrait aboutir à la surface d'une étoile. La lumière qui nous parvient des astres devrait donc rendre le ciel nocturne aussi brillant que la surface d'une étoile. Or ce n'est pas le cas. Pourquoi ?

De nombreuses réponses ont été proposées à cette question bien plus profonde qu'il n'y paraît. L'une d'elles consiste à supposer que le milieu entre les étoiles, voire entre les galaxies, est rempli de gaz et de poussière qui absorbent la lumière des astres lointains. Mais cela ne résout pas le paradoxe d'Olbers, car la lumière absorbée par la poussière finirait par l'échauffer, de sorte que, *in fine*, elle rayonnerait autant que les astres lointains...

Une autre idée invoque l'expansion de l'Univers. La dilatation de l'espace allonge les longueurs d'onde des photons, les particules dont est constitué tout rayonnement électromagnétique. Cet effet, d'autant plus

prononcé que les photons proviennent d'un objet lointain, décale le spectre lumineux vers les grandes longueurs d'onde, c'est-à-dire vers le rouge.

Les longueurs d'onde du visible deviendraient ainsi... invisibles, puisqu'elles se situeraient dans l'infrarouge. Toutefois, le rayonnement ultraviolet des astres lointains devrait, lui, être décalé vers le visible. Or on constate que la luminosité du ciel nocturne dans le visible ne correspond pas à la somme du rayonnement ultraviolet des astres lointains. L'expansion de l'Univers ne suffit donc pas à expliquer pourquoi la nuit est noire.

Un univers infini, mais pas infiniment vieux

On considère aujourd'hui que le paradoxe d'Olbers s'explique par deux faits. Le premier est que, même si l'Univers est infiniment grand, il n'est pas infiniment vieux. Estimé par plusieurs méthodes, son âge est de l'ordre de 14 milliards d'années. Les données du satellite *Planck* ont d'ailleurs livré la valeur la plus précise à ce jour : 13,8 milliards d'années.

Ce point est essentiel : comme les ondes électromagnétiques se propagent à une vitesse finie d'environ 300 000 kilomètres par seconde, nous ne percevons la présence d'un astre lointain que si sa lumière a eu le temps de nous parvenir.

Ce délai de propagation des ondes lumineuses ne nous est pas familier, car, pour les distances habituelles, il est trop petit. Lorsque

nous assistons à un concert depuis un balcon suspendu, par exemple, la lumière indiquant que le chef d'orchestre situé à 30 mètres a levé sa baguette nous parvient en moins d'un dixième de milliardième de seconde, ce qui est imperceptible. En revanche, lors des missions *Apollo*, les astronautes présents sur la Lune recevaient les messages du centre de contrôle situé sur Terre avec un décalage nettement perceptible de 1,26 seconde.

Ainsi, le temps de propagation augmente avec la distance et nous ne captions donc aucun signal lumineux émis à une distance supérieure à celle que la lumière a pu parcourir en 13,8 milliards d'années.

L'autre fait qui contribue à l'obscurité nocturne est que les étoiles et les galaxies ne sont pas éternelles. D'une part, elles n'ont pas toujours existé ; d'autre part, elles finissent toutes par pâlir, puis par cesser de briller.

La combinaison de l'âge de l'Univers et de la durée de vie finie des sources lumineuses qui le peuplent conspire avec la vitesse de la lumière pour limiter la portée de notre regard sur l'Univers. Ainsi, au contraire de ce que supposait Olbers, il nous sera toujours impossible de percevoir simultanément les émissions lumineuses de tous les astres lointains – puisque tous les rayonnements émis ne nous ont pas encore atteints et qu'une partie des sources de lumière se sont déjà éteintes.

Karen KWITTER est astronome au Williams College, dans le Massachusetts (États-Unis).



Abonnez-vous à

POUR LA
SCIENCE

Plus de
24%
de réduction

OFFRE DÉCOUVERTE

12 n^{os} par an

4,90€

PAR MOIS

SEULEMENT

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagnée de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☒ **OUI**, je m'abonne à **Pour la Science** formule Découverte.
Je règle par prélèvement automatique de 4,90€ par mois et
je complète l'autorisation ci-contre. **J'économise 24% par mois.**
(IPV4F90)

COORDONNÉES

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____

Ville : _____

☐ Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____

@ _____

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

Delai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés valable jusqu'au 31/01/2017 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre.

MANDAT DE PRELEVEMENT SEPA En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre ces instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) : _____

BAN : _____

Numéro d'identification international du compte bancaire) : _____

Établissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Date et signature

Organisme Créancier

Pour la Science - 8 rue Férou - 75006 Paris

ICB FR92ZZ426900

ICB de référence unique de mandat (RUM)

Joindre un RIB

SCIENCE & GASTRONOMIE

Imperméabilité au gras

L'observation du glaçage des navets élimine une idée reçue sur la pénétration du beurre dans le légume.

Hervé THIS

On dit que les blancs en neige sont plus fermes quand ils sont salés ; que l'huile d'olive pénètre moins dans les frites que les autres huiles ; que l'ail bleuit quand est posé sur des tomates que l'on cuit ; que la viande se contracte au réfrigérateur ; que les légumes qui séjournent dans l'eau perdent leur goût... Cette litanie est lancinante. Le nombre de ce que l'on nomme les « précisions culinaires » est si considérable (plus de 25 000) qu'il est vain d'espérer régler ces questions dans un délai raisonnable, d'autant que les tests réservent des surprises.

Nous avons exploré le « glaçage » des navets, type de cuisson répandu et censé faire pénétrer la matière grasse à l'intérieur des légumes. Est-ce vraiment le cas ?

Dans la cuisine française, on distingue deux glaçages : à blanc et à brun. Dans les deux cas, les navets sont épluchés, éventuellement divisés, placés dans une casserole avec de l'eau (à hauteur), du beurre et du sucre. La cuisson est censée évaporer l'eau, faire entrer le beurre dans les navets et couvrir ces derniers d'une pellicule brillante : incolore pour le glaçage à blanc, brune pour le glaçage à brun, en raison d'une caramélisation du sucre.

Mais le beurre entre-t-il vraiment dans les tissus végétaux ? Ces derniers sont de divers types. Les principaux sont le tissu parenchymateux, où les cellules végétales sont jointives, et les tissus conducteurs, qui propagent la sève (brute, c'est-à-dire aspirée du sol, ou élaborée, c'est-à-dire chargée de sucres et d'acides aminés synthétisés dans les feuilles). Par ailleurs, à la membrane des

cellules végétales s'ajoute une paroi faite de celluloses, de pectines et d'autres composés, qui forme un ciment intercellulaire. Comment le beurre pénétrerait-il dans le légume ?

« Assurons-nous bien du fait, avant que de nous inquiéter de la cause », a écrit Fontenelle ! Aussi, avant de nous préoccuper des mécanismes éventuels de pénétration de la matière grasse, nous avons glacé des navets en les pesant à intervalles réguliers. Leur masse était constante, aux incertitudes de mesure près (près de 0,5 gramme en plus ou en moins pour 100 grammes de navet, en raison de l'adhérence de l'eau et de la matière grasse à la surface des navets). Était-ce une indication suffisante ? Non, car les navets auraient pu absorber la matière grasse et perdre de l'eau.

De l'eau en moins, mais pas de gras en plus

Puis, quand toute l'eau de glaçage a été évaporée, nous avons vu la masse des navets diminuer, jusqu'à atteindre 60 % de la masse initiale ! La variation était inattendue, car des navets cuits dans de l'eau ont une masse qui ne change pas. Manifestement, les navets perdent leur eau quand ils ne sont accompagnés que de sucre et de matière grasse, la seule eau restante étant la leur.

Mais la matière grasse ? Pour savoir si elle pénétrait, nous avons repris les expériences en colorant en rouge, à l'aide d'un colorant hydrophobe, la matière grasse – beurre ou huile. Le glaçage à blanc étant atteint, nous avons ouvert les navets et observé un beau blanc immaculé. Même pour les légumes un



peu âgés, creux, où la matière grasse aurait pu s'introduire par capillarité.

Pourquoi alors les cuisiniers ont-ils imaginé cette migration de la matière grasse ? Parce que le volume de beurre diminue lors de la cuisson, en raison de l'évaporation du petit-lait (jusqu'à 18 %) et d'éventuelles projections ? On ne le saura sans doute jamais. En tout cas, l'absence de pénétration a été testée plusieurs fois, toujours avec le même résultat.

Ce qui demeure, c'est cette spectaculaire perte d'eau des navets, après que l'eau de glaçage a été évaporée, pour les glaçages à blanc, et *a fortiori* pour les glaçages à brun. On comprend alors que les légumes prennent non seulement un goût supérieur, en raison des diverses réactions chimiques qui accompagnent le brunissement (souvenons-nous que du sucre est présent), mais aussi une consistance plus ferme, moins aqueuse : 40 % de perte d'eau, ce n'est pas rien.

Une précision culinaire réfutée sur 25 000. Plus que 24 999 ! Mais c'est ainsi que la cuisine, assise sur des techniques avérées, sera plus belle et donnera de meilleurs résultats.



Hervé THIS, physicochimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech et directeur scientifique de la fondation Science & culture alimentaire Académie des sciences.



Retrouvez la rubrique science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

Complétez votre collection!



Retrouvez tous les numéros depuis 1996

Commandez vos numéros sur

www.pourlascience.fr

POUR LA
SCIENCE **ARCHIVES**



MÉDECINE

L'Humanité survivra-t-elle à la médecine ?

Michel Odent

Myriadis, 2016
(120 pages, 16 euros)

Mettre au monde par les voies naturelles est-il passéiste ? L'intrusion de la médecine dans une fonction aussi fondamentale que la reproduction et l'accouchement par voies naturelles pourrait aboutir à nier la vraie utilité à nos organes reproducteurs. Pour l'auteur, qui a exercé vingt-cinq ans comme chirurgien et gynécologue-obstétricien, la tendance à la quasi-généralisation de la césarienne programmée (jusqu'à 50 % en ville) met non seulement les parturientes, mais aussi les enfants en danger de cette pratique, devant des problèmes insoupçonnés.

Pourtant, cette question est peu évoquée, parce qu'elle remet en cause le pouvoir médical sur le processus de l'accouchement. Celui-ci s'impose d'autant plus facilement que la sécurisation de la naissance qu'il apporte répond à l'attente de femmes qui revendiquent une liberté assumée. À travers de nombreuses interrogations égrenées au fil de ce livre, l'auteur, qui a développé depuis le concept de « santé primale ».



cherche à mettre en évidence des corrélations entre les événements marquant la période périnatale - la vie fœtale, la naissance et la première année de l'enfant - et la santé des adultes qui les ont vécus. Il s'interroge notamment sur les conséquences durables pour l'enfant d'une naissance par césarienne et sur sa santé (asthme, troubles du comportement, hyperactivité, autisme...) et sur sa personnalité une fois adulte (obésité, toxicomanie, etc.).

Ce plaidoyer pour un retour au bon sens et à la physiologie s'appuie sur des disciplines émergentes en sciences humaines pour défendre la récente idée d'une « écologie périnatale ». Il nous incite à plus d'indépendance et de résistance, pour oser un changement du paradigme de la naissance avant qu'il ne soit trop tard ».

Bernard Schmitt
CERNH, Lorient

PALEOANTHROPOLOGIE

Néandertal, mon frère

Silvana Condemi
et François Savatier

Flammarion, 2016
(250 pages, 21 euros)

L'homme de Néandertal fascine. Articles scientifiques ou de vulgarisation, colloques et expositions tentent de documenter ce dossier et de faire partager l'état des connaissances acquises par des recherches relativement récentes. Analyser précisément cette autre humanité et communiquer cette analyse à un grand public n'est pas simple.

C'est pourtant ce que les auteurs de cet ouvrage sont parvenus à faire. Silvana Condemi est paléontologue au CNRS, et ses travaux sur les fossiles humains sont reconnus. François Savatier

est journaliste scientifique, à *Pour la Science*. Pour en savoir plus sur les Néandertaliens, il est allé à la rencontre de la chercheuse. Les échanges ont été nombreux et féconds ; ils ont abouti à ce livre remarquable par la forme et par le fond. La lecture en est aisée, le style agréable, le vocabulaire simple et précis ; la formulation parfois humoristique des titres



morphologie des Néandertaliens, leur mode de vie (leur alimentation, leur territoire), leurs pratiques culturelles et même leur « sociologie » (avec un bel essai sur les « lignées » néandertaliennes, qui se sont ensuite mêlées à celles d'*Homo sapiens*). Chacun des chapitres pose clairement les questions, expose les données archéologiques et génétiques les plus actuelles puis les met en perspective grâce à une lecture anthropologique et environnementale ; les conclusions sont claires, mais jamais closes. Ce livre utile et agréable met en avant la culture âpre de Néandertal et la capacité de résilience de ce « frère », qui a fini par disparaître mais dont il subsiste chez l'« homme moderne » une part génétique notable.

Dominique Garcia
Président de l'Irran, Paris

HISTOIRE-ZOOLOGIE

L'Incroyable Histoire de l'éléphant Hans

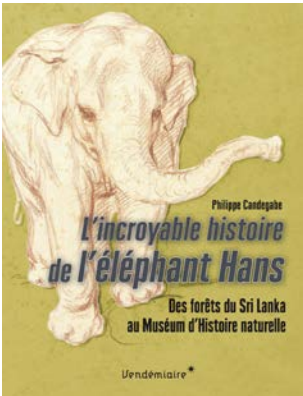
Philippe Candegabe

Vendémiaire, 2016
(320 pages, 22 euros)

Les animaux, comme les humains, peuvent avoir une histoire, et même devenir en leur temps des célébrités. C'est ce que nous montre avec beaucoup de talent l'auteur de ce livre très bien documenté. Il nous raconte le destin étonnant de deux éléphants, un mâle et une femelle, capturés jeunes dans une forêt de Ceylan et envoyés aux Pays-Bas pour y trouver place dans la ménagerie du souverain. Le *Stathouder*.

Après quelques années plutôt éreintées, tout change pour Hans et Parkie, comme on les a nommés, lorsque les troupes françaises envahissent le pays en 1795. Comme nous le rappelle l'auteur, le pillage

les richesses culturelles et scientifiques des pays occupés par les armées de la Révolution et de l'Empire n'a pas grand-chose à envier à celui que commettront les nazis... Les vainqueurs transfèrent les éléments à la ménagerie du Muséum de Paris, nouvellement créée, où ils parviennent en 1798, au terme d'un voyage éprouvant. Les animaux susciteront l'intérêt des naturalistes et l'enthousiasme du public, puis à leur mort seront naturalisés.



Hans connaîtra un dernier voyage, *post mortem*, jusqu'au Muséum de Bourges, dont il est depuis 1931 une des pièces maîtresses.

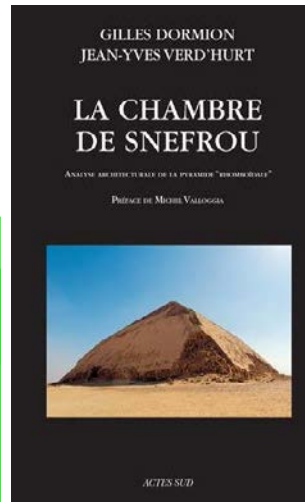
En nous racontant cette histoire peu banale, l'auteur aborde maints sujets souvent inattendus. Les éléphants sont tour à tour des cadeaux princiers, des spécimens zoologiques objets de diverses études parfois bizarres, à une époque où l'histoire naturelle d'antan commence à se transformer en véritable science, et le sujet de chansons, de portraits et de pièces de théâtre. En relatant ces épisodes souvent tragiques, l'auteur brosse un portrait original et incisif de la communauté intellectuelle hollandaise et française en cette époque mouvementée, face à ce qui constitue un événement scientifique et culturel notable. Une incontestable réussite.

Eric Buffetaut
CNRS-ENS, Paris

EGYPTOLOGIE

La Chambre de Snéfrou

Gilles Dormion
et Jean-Yves Verd'hurt
Actes Sud, 2016
(240 pages, 28 euros)



Pour la troisième fois, les deux auteurs poursuivent leur quête de la « chambre cachée » au sein d'une pyramide.

Après celle de Kheops à Gizeh et celle de Meïdoum, dont le possesseur reste inconnu, ils s'intéressent cette fois à Dahchour et plus particulièrement à la pyramide sud du site. Celle-ci, dite rhomboïdale en raison de son profil en double pente, a été conçue pour abriter la sépulture de Snéfrou, premier pharaon de la IV^e dynastie, à qui on attribue parfois la paternité de deux autres monuments : la pyramide de Meïdoum et la pyramide nord de Dahchour, même si on a aussi proposé son prédécesseur, Houni, pour le premier.

La IV^e dynastie est une période de recherche et d'expérimentation. La pyramide lisse y voit le jour en remplacement de la pyramide à degrés qui caractérisait la III^e dynastie. Ce sont cette inexpérience et ces tâtonnements qui ont provoqué des dommages catastrophiques à Dahchour-sud : l'enrobage d'une pyramide déjà fissurée par des lits déversés aurait conduit à un ripage (glissement) de celui-ci. Cela, joint à la mauvaise qualité de certains calcaires, a mis en danger la solidité des appartements funéraires. À partir d'une étude architecturale fine et de la comparaison avec d'autres monuments, notamment la grande pyramide de Gizeh, les auteurs

tiennent compte des solutions mises en œuvre par les constructeurs pour remédier à ces catastrophes. Ce faisant, ils fournissent des analyses permettant de repenser la chronologie et l'attribution des pyramides du début de la V^e dynastie, à partir notamment de l'évolution des techniques, comme le remplacement des lits déversés par des lits horizontaux ou l'accroissement des portées dans la couverture des chambres. Constatant d'autre part que ladite chambre funéraire de Dahchour-sud n'a jamais contenu de sarcophage, ils en concluent qu'elle n'est en fait qu'une antichambre et qu'il faut donc chercher ailleurs la sépulture. Une chambre supplémentaire, dont l'existence paraît confirmée par la microgravimétrie, resterait à découvrir. Quoi qu'il en soit, leur ouvrage constitue un outil de travail sérieux pour les égyptologues et un jalon de plus dans l'étude architecturale des pyramides, encore loin d'être achevée.

Nadine Guilhou
Université de Montpellier

Le Carnet scientifique

Mathieu Vidard
Grasset, 2016
(240 pages, 18 euros).

Le journaliste scientifique

rencontre souvent l'improbable. L'auteur, qui anime l'émission *La Tête au Carré* sur France Inter, nous propose ce petit carnet de curiosités où il aborde et répond à mille questions que l'on se pose, ne se pose pas ou ne s'était pas encore posées, du genre « Combien pèse l'humanité ? » ou « King Kong a-t-il existé ? » Son petit *opus* constitue un divertissement enrichissant pour nos moments perdus. Il peut être mis entre toutes les mains, particulièrement celles des jeunes, dont il stimulera l'imagination.

Le Voyage des pierres

Pierre Arriuermerlou
Dixus, 2016
(224 pages, 29 euros).

Vous aimez les pierres ? Leur contact minéral ? Les croyances les entourant vous intéressent ? Alors ce livre est pour vous ! Cette étude avant tout anthropologique de ce que les pierres sont pour nous ravira les amateurs de pierres, qu'elles soient naturelles, tombées du ciel, ignées, de construction, sculptées, taillées, monumentales, légendaires, sacrées... Disséminés dans les textes, des faits scientifiques rapportés habilement font de ce livre poétique, préfacé par le directeur du muséum de Toulouse, un ouvrage sérieux.

Et si la Terre était plate ?

René Cuillierier
Belin, 2016
(302 pages, 20 euros).

Quelqu'un qui vous parle de science avec des « bazar » ou des « bonne pioche » ? C'est l'auteur de ce recueil, habitué qu'il est à s'adresser aux adolescents dans une rubrique de *Science & Vie Junior*. Il raisonne sur tout à partir de trois données et vous donne l'impression d'être intelligent, tellement c'est facile à saisir. Lisez ces instructifs exercices de pensée que sont un tunnel à travers la Terre, la vie sans le sexe, empilement de un million de briques de Lego, l'existence du Père Noël, la pratique du français au XXI^e siècle, l'existence des dahuts ou une civilisation disparue fondée par des dinosaures intelligents.

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr



TRISTE VÉRITÉ, VRAIMENT ?

En se demandant : « Qui sait si la vérité n'est pas triste ? » (*Dialogues et fragments philosophiques*), Ernest Renan songeait au fait que les hommes semblent

incapables de se gouverner sans commettre l'horreurs. Ainsi, on n'est jamais sûr qu'une découverte scientifique ne servira pas à des engins de mort. Cela mis à part, il ne semble pas y avoir de sens à se demander si, en sciences, la vérité est triste. Que l'ADN se déploie en double hélice, que quatre couleurs suffisent pour colorier une carte, que les ondes gravitationnelles existent – ce n'est pas triste. Ni gai : la joie des chercheurs serait la même si la vérité qu'ils découvraient était autre. Ce n'est pas la vérité qui les exalte, mais l'exploit d'y accéder.

Il y a pourtant une tristesse inhérente aux sciences. Par exemple, dans le fait qu'elles sont en perpétuel devenir. Certes, cela réjouit le



chercheur jeune, qui escompte que son talent trouvera à se déployer. Mais, lorsqu'il aura vieilli, il constatera sans doute que son apport a fait son temps. N'est-ce pas triste ?

Et puis, les chercheurs se laissent volontiers guider par leur conception de la beauté, qui n'a pas forcément de pertinence scientifique. L'histoire des sciences regorge de théories magnifiques fracassées sur de vilains faits. Faut-il en conclure que les vérités sont laides ? Si oui, cette conclusion est une autre vérité triste.

CONQUÊTE SPATIALE ARCHAÏQUE

Des innombrables objets d'origine humaine sont en orbite autour de la Terre : satellites actifs ou en fin de vie, étages de

usées et autres débris. S'y ajoutent des objets plus saugrenus : gants, caméras, appareils photo, pinces, tournevis, sacs à outils... Qu'ont-ils à faire là ? Rien. Ils ont été perdus par des astronautes travaillant dans l'espace (d'après Christophe Bonnal, *Pollution spatiale*, Belin, 2016). Sur Terre, quand on laisse tomber un objet, on le ramasse en espérant qu'il ne s'est pas cassé. Dans l'espace, on ne craint pas qu'il se casse, mais, parti sur sa propre orbite, il ne peut pas être rattrapé.



Le moderne ne libère jamais de l'archaïque. Évoluer en scaphandre mille kilomètres au-dessus de la Terre – quoi de plus moderne ? Laisser échapper l'objet qu'on tient et préférer un juron, j'imagine – quoi de plus archaïque ? On peut se mettre en congé de la Terre, pas de l'archaïque.

GRAND PRO, PETITE VUE

Exceller dans une technique n'incite guère à discuter la vision du monde qui la sous-tend. Le temps passé à le faire serait perdu pour la pratique. Chaque profession tend ainsi à se forger des cécités. La médecine scientifique, par exemple, compte beaucoup sur le progrès de ses appareils et sous-estime le désarroi des patients qui, ballottés d'examen en examen, ont affaire à une multitude de spécialistes dont aucun n'a de vue globale.

L'éloge « Untel est un grand pro » devrait alors être pris avec circonspection. Il est fondé s'il provient de collègues, mais ceux-ci partagent les mêmes cécités. Il signifie qu'Untel adhère pleinement à la profession, et ne réinterroge pas le projet sous-jacent. Admirer sans réserve un « grand pro », c'est faire la part trop belle à la seule maîtrise technique.

MESURER LA DIFFICULTÉ

Affronter la difficulté est souvent un plaisir. Il y a des amateurs de sudoku « diaboliques » ou du jeu vidéo *Diablo*, dont les niveaux supérieurs ont pour nom Calvaire, puis Tourment. Moins satanique, l'échelle de difficulté d'un autre jeu (dans sa version française !) est déclinée en Rookie, Pro, All-Star, Super All-Star, Hall of Fame.

On a beau dire que la difficulté est subjective, nombre d'activités la quantifient. La difficulté des sonates pour piano de Beethoven s'échelonne du 7^e au 16^e degré des tablettes d'Henry Lemoine. Le niveau de difficulté de la confection de maquettes en papier va de 1 à 5. Quant à l'escalade, elle témoigne de la complexité des relations internationales : selon Wikipédia, une escalade de difficulté cotée 5.12a dans le système états-unien est cotée 7a+ par les Français, Villa par les Brésiliens, 24 par les Autrichiens, etc.



Autant d'activités, autant de façons de mesurer la difficulté. Une unification s'impose. La physique, qui définit le mètre et la seconde avec une précision sidérante, a la maestria voulue pour définir une unité de mesure, qui sera quelque chose comme la difficulté rencontrée par un électron cherchant à passer de tel état d'excitation à tel autre. Les électrons étant partout, les exploits humains pourront tous être rapportés à cette unité, donc comparés. On saura objectivement si découvrir la double hélice (Crick et Watson, 1953) est plus ou moins difficile que vaincre l'Everest (Hillary et Tensing, 1953), si gagner le premier Tour de France (Garin, 1903) est plus ou moins difficile que fonder la relativité restreinte (Einstein, 1905) ou si écrire cette chronique (Nordon, 2017) est plus ou moins difficile que dire des bêtises.

ENTREPRISES, COLLECTIVITÉS, FINANCEZ VOS BESOINS DE RECHERCHE,

DANS LES DOMAINES DES PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES, DES SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA VIE, DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES



Dans le cadre d'un partenariat entre un étudiant, son laboratoire d'accueil et vous,
l'ADEME vous aide à produire des connaissances nouvelles et renforce les capacités humaines
de votre R&D en finançant un doctorant pendant 3 ans !

ENSEMBLE POUR CONSTRUIRE UN MONDE PLUS DURABLE

www.ademe.fr/theses



30

30 ans
Cité



> EXPO <
11.10.16
06.08.17

QUOI DE NEUF AU MOYEN ÂGE ?

TOUT CE QUE L'ARCHEOLOGIE NOUS REVELE

(M) Porte de la Villette

partenariat avec



l'express

l'histoire

Slate.fr

histoire

SCIENCES
AVENIR

éléphant



coproduit avec

Institut national
de recherches
archéologiques
préventives

Inrap