

# POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

MATHÉMATIQUES  
**LE PRINCIPE  
DES TIROIRS FAIT  
DES PRODIGES**

BIOLOGIE  
**LE BLOB,  
CELLULE GÉANTE...  
ET INTELLIGENTE!**

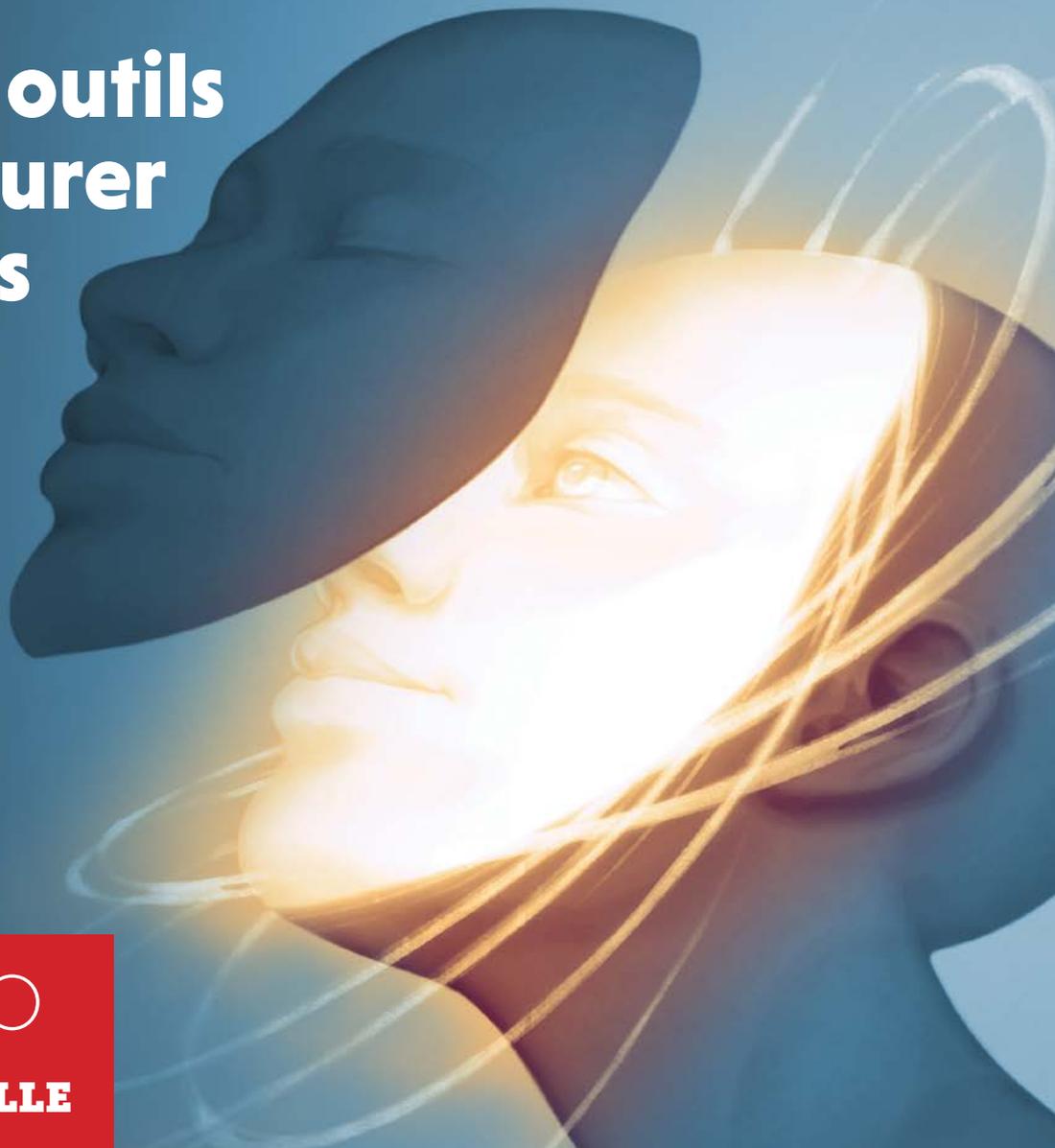
ASTRONOMIE  
**NEW HORIZONS  
RÉVÈLE LES FACES  
CACHÉES DE PLUTON**



JANVIER 2018  
N° 483

# DÉTECTER LA CONSCIENCE

Enfin des outils  
pour mesurer  
les degrés  
de coma



PORTFOLIO  
**VOIR LES FLEURS  
COMME UNE ABEILLE**

# 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](http://www.ademe.fr/theses)



**POUR LA  
SCIENCE**

**www.pourlascience.fr**  
170 bis boulevard du Montparnasse - 75014 Paris  
Tél. 01 55 42 84 00

**Groupe POUR LA SCIENCE**  
**Directrice des rédactions:** Cécile Lestienne

**POUR LA SCIENCE**  
**Rédacteur en chef:** Maurice Mashaal  
**Rédactrice en chef adjointe:** Marie-Neige Cordonnier  
**Rédacteurs:** François Savatier, Sean Bailly

**HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE**  
**Rédacteur en chef adjoint:** Loïc Mangin

**Développement numérique:** Philippe Ribeau-Gésippe  
**Conception graphique:** William Londiche  
**Directrice artistique:** Céline Lapert  
**Maquette:** Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, assistés de Marie Marty  
**Révisseuse:** Anne-Rozenn Jouble  
**Marketing & diffusion:** Laurence Hay et Arthur Peys  
**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:** Delphine Angst, Cédric Blanpain, Anne-Laure Fogliani, François Forget, Hélène Gélot, Capucine Jahan, Claudine Katan, Claudine Lacroix, Julien Lavalle, Lydie Morel, Christophe Pichon, Elifsu Sabuncu, Marc-André Sélosse, Sergueï Skipetrov

**PRESSE ET COMMUNICATION**  
Susan Mackie  
susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

**PUBLICITÉ France**  
stephanie.jullien@pourlascience.fr

**ABONNEMENTS**  
**Abonnement en ligne:** <http://boutique.pourlascience.fr>  
**Courriel:** pourlascience@abopress.fr  
Tél.: 03 67 07 98 17  
**Adresse postale:** Service des abonnements - Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

**Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)**  
**France métropolitaine:** 59 euros - Europe: 71 euros  
**Reste du monde:** 85,25 euros

**DIFFUSION**  
**Contact kiosques:** À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet  
Tél. 04 88 15 12 41

**Information/modification de service/réassort:**  
[www.direct-editeurs.fr](http://www.direct-editeurs.fr)

#### SCIENTIFIC AMERICAN

**Editor in chief:** Mariette DiChristina  
**President:** Dean Sanderson

**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. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.  
© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, 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. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ». En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

**Origine du papier:** Autriche  
**Taux de fibres recyclées:** 30 %  
**«Eutrophisation» ou «Impact sur l'eau»:** P<sub>tot</sub> 0,007 kg/tonne



**MAURICE  
MASHAAL**  
Rédacteur  
en chef

## LA CONSCIENCE OBJECTIVÉE

**L**a conscience est un phénomène énigmatique. Une perception consciente est subjective, propre à chaque individu et incommunicable. Elle semble échapper à toute objectivation. Comment savez-vous que votre interlocuteur est conscient, qu'il voit le rouge ou le jaune de la même façon que vous, qu'un son aigu lui fait le même effet qu'à vous? En toute rigueur, vous ne le savez pas; vous le supposez, parce qu'il est fait comme vous, parce qu'il se comporte à peu près comme vous, parce qu'il répond comme vous aux questions, etc. Mais il vous est impossible d'«entrer dans sa tête».

La question, un peu théorique, devient beaucoup plus concrète et pressante quand on est confronté à des personnes qui ne réagissent pas et ne communiquent pas, notamment des patients souffrant de lésions cérébrales et plongés dans le coma. Là, il importe de savoir si la personne ressent quelque chose, si elle souffre par exemple: il en va des difficiles décisions à prendre par les médecins et la famille concernant les soins.

Bien que la conscience soit un phénomène subjectif, elle se manifeste dans l'activité cérébrale. Or les neuroscientifiques ont réalisé de grands progrès pour caractériser l'état de conscience d'un sujet à partir de l'activité de son cerveau. Le chercheur Christof Koch nous présente ainsi une méthode qui permet littéralement de mesurer l'état de conscience d'un patient - une méthode qui s'appuie sur une théorie particulière de la conscience et que mettent en perspective deux autres grands spécialistes, Steven Laureys et Lionel Naccache (voir pages 26 à 40).

Les caractéristiques observables de la conscience se précisent ainsi, comme ses rouages que tentent de décrire plusieurs théories neuroscientifiques. Reste ce qu'on appelle le «problème difficile de la conscience»: comment une qualité mentale subjective, non matérielle, peut-elle émerger d'un système matériel comme le cerveau? On est loin d'une réponse à cette question. Or il s'agit là d'une énigme majeure, existentielle: si aucun être n'était conscient, nulle part, jamais, alors l'existence du monde et son inexistence seraient équivalentes.

# S OMMAIRE

N° 483 /  
Janvier 2018

## ACTUALITÉS

P. 6

### ÉCHOS DES LABOS

- Une peau humaine régénérée
- L'évolution des inégalités de richesse
- Comment le Sahara vert a disparu
- Des cristaux liquides dans tous leurs états
- Des photons font la paire
- Un trésor retrouvé à Cluny
- Les ptérosaures pondaient en colonie
- Un liquide de spins quantique
- Pourquoi l'océan d'Encelade ne gèle pas

P. 18

### LES LIVRES DU MOIS

P. 20

### AGENDA

P. 22

### CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES

Internaute,  
quel est ton nom?

Gilles Dowek

P. 24

### HOMO SAPIENS INFORMATIUS

Weinstein  
et la viscosité sociale

Gérald Bronner

## GRANDS FORMATS

P. 42

### PLANÉTOLOGIE

### LES FACES CACHÉES DE PLUTON

Alan Stern

La mission spatiale *New Horizons* a tout changé à ce que nous croyions savoir sur la neuvième planète.



P. 52

### BIOLOGIE

### LE BLOB, CELLULE GÉANTE... ET INTELLIGENTE!

Audrey Dussutour  
et David Vogel

Étonnant organisme macroscopique constitué d'une seule cellule, le blob peut apprendre et même transmettre son savoir. Il est capable de trouver le plus court chemin pour sortir d'un labyrinthe ou d'imiter le réseau ferroviaire japonais.



P. 58

### PORTFOLIO

### VOIR LES FLEURS COMME UNE ABEILLE

Aline Raynal-Roques  
et Albert Roguenant

Les insectes sont, contrairement aux humains, sensibles à l'ultraviolet. Cette capacité leur confère une vision des fleurs bien différente de la nôtre. Démonstration avec des prises de vue sous éclairage ultraviolet.



POUR LA  
**SCIENCE.FR**

LETTRE D'INFORMATION

NE MANQUEZ PAS  
LA PARUTION DE  
VOTRE MAGAZINE  
GRÂCE À LA NEWSLETTER

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



Inscrivez-vous  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

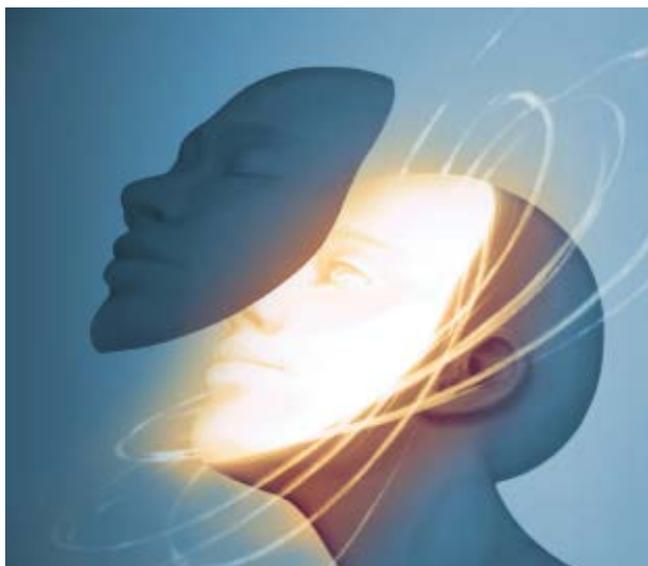


En couverture:  
© Ashley Mackenzie

Les portraits des contributeurs  
sont de Seb Jarnot



# À LA UNE



## NEUROSCIENCES

P. 26

### MESURER LA CONSCIENCE EST ENFIN POSSIBLE

*Christof Koch*

Comment savoir si une personne est consciente ou non quand elle ne peut pas communiquer avec autrui? Une méthode consistant à enregistrer l'activité électrique du cerveau juste après une stimulation magnétique a fait ses preuves.

P. 36

### « LE CONCEPT MÊME DE CONSCIENCE MINIMALE EST À REVOIR »

*Entretien avec Lionel Naccache*

Grâce à de nouvelles approches combinant neuro-imagerie et mathématiques, on évalue de mieux en mieux l'état de conscience d'une personne – suffisamment pour réviser la classification des états de la conscience.



P. 68

## HISTOIRE DES SCIENCES

### DES BACILLES DU CHARBON DANS L'AIR SOVIÉTIQUE

*Paul Keim, David H. Walker et Raymond A. Zilinskas*

Les armes biologiques sont dangereuses pour tout le monde. Illustration avec un accident survenu en Union soviétique il y a près de quarante ans, et dont on connaît mieux aujourd'hui les détails.

## RENDEZ-VOUS

P. 74

## LOGIQUE & CALCUL

### TRIVIAL, MAIS PUISSANT: LE PRINCIPE DES TIROIRS

*Jean-Paul Delahaye*

Depuis son introduction en théorie des nombres par Dirichlet, le « principe des tiroirs » bien connu se révèle un levier de raisonnement d'une déconcertante efficacité.

P. 80

## ART & SCIENCE

### Ceci n'est pas un puzzle

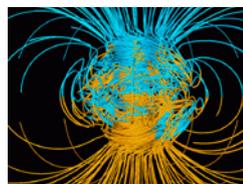
*Loïc Mangin*

P. 82

## IDÉES DE PHYSIQUE

### Des pendules de Foucault sur puce

*Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik*



P. 86

## SCIENCE & FICTION

### Magnéto, maître du champ magnétique

*Sébastien Steyer et Roland Lehoucq*

P. 92

## CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

### L'homme s'est-il autodomestiqué?

*Hervé Le Guyader*

P. 96

## SCIENCE & GASTRONOMIE

### Meringues en poupées russes

*Hervé This*

P. 98

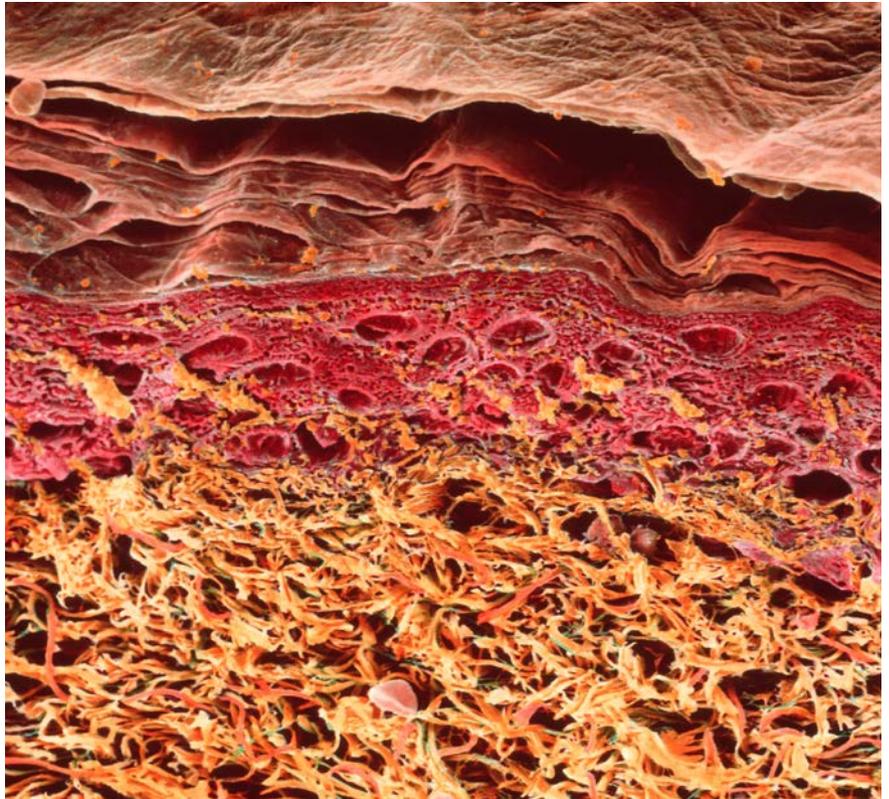
## À PICORER

# A

## CTUALITÉS

- P.6 Échos des labos
- P.18 Livres du mois
- P.20 Agenda
- P.22 Homo sapiens informaticus
- P.24 Cabinet de curiosités sociologiques

# UNE PEAU HUMAINE RÉGÉNÉRÉE À L'AIDE DE CELLULES SOUCHES



Chez un individu sain, l'épiderme (ici en rose et rouge sur une coupe transversale vue en microscopie électronique à balayage) est solidement fixé au derme (en orange). Ce n'est plus le cas chez une personne atteinte d'épidermolyse bulleuse.

**La peau d'un enfant atteint d'une maladie génétique rare a été réparée grâce à ses propres cellules souches, que l'on a génétiquement corrigées avant de les greffer.**

**A**gé de sept ans, l'enfant était dans un état critique quand il fut admis, en juin 2015, à l'hôpital des enfants de l'université de la Ruhr, à Bochum, en Allemagne. Atteint d'une maladie génétique de la peau et des muqueuses, l'épidermolyse bulleuse jonctionnelle, il avait perdu une partie de son épiderme à la suite d'une infection bactérienne et aucun traitement n'améliorait son état. Avec l'accord de ses parents et du comité éthique de l'université, l'équipe

médicale décida de pratiquer sur l'enfant une thérapie à la fois cellulaire et génique. Aujourd'hui, deux ans plus tard, celle-ci se révèle un succès.

Les épidermolyse bulleuses sont un groupe de maladies génétiques rares de la peau dues à des mutations sur des gènes codant des protéines de la matrice qui sert de support aux cellules, la matrice extracellulaire. Dans la forme jonctionnelle de la maladie, les mutations touchent des gènes qui codent la laminine-332, une protéine contribuant à l'ancrage des cellules dans la matrice. Cette protéine intervient

dans la fixation de l'épiderme (la couche cellulaire externe de la peau qui protège le corps de l'environnement extérieur) sur le derme (la couche qui donne à la peau sa résistance et son élasticité). Quand la laminine est mutée, l'adhérence des deux couches est plus faible et l'épiderme se décolle au moindre frottement. Aussi, dès la naissance de la personne atteinte, des lésions bulleuses apparaissent sur tout son corps.

En septembre 2015, l'enfant avait perdu 80 % de sa peau. Dans une région intacte, Tobias Hirsch et ses collègues ont prélevé un fragment de 4 centimètres carrés qu'ils ont mis en culture. Ils ont ensuite introduit le gène non muté de la laminine dans les cellules de l'échantillon, puis ont fait croître ce dernier jusqu'à obtenir près de 1 mètre carré de greffon,

tout en vérifiant que le nouveau gène ne perturbait pas la séquence d'autres gènes lorsqu'il s'insérait dans le génome des cellules. Le greffon a alors été transplanté sur le derme de l'enfant entre octobre 2015 et janvier 2016, d'abord sur les lésions des jambes et des bras, puis sur celles du dos et, enfin, sur les lésions restantes.

Au bout de quatre mois, non seulement l'enfant n'avait pas rejeté la greffe, mais l'épiderme s'était régénéré et adhérait désormais fermement au derme, sans former de cloques, signe que des cellules portant le bon gène de la laminine avaient colonisé durablement la peau. Par quel mécanisme? Dans la culture des cellules du patient, les chercheurs ont repéré trois types cellulaires: des colonies de cellules non différenciées qui prolifèrent et sont capables de se renouveler (holoclon), des cellules différenciées se renouvelant difficilement (paraclon) et des intermédiaires (méröclon). Le renouvellement du greffon était-il assuré par les holoclon?

Pour le savoir, les chercheurs ont suivi le devenir de ces différents types cellulaires à l'aide de prélèvements effectués avant la greffe, et quatre et huit mois après. Ils ont ainsi observé que nombre de paraclon et de méröclon avaient peu à peu disparu. Au bout de huit mois, la quasi-totalité de la peau était dérivée d'une petite population des holoclon initiaux, ce qui suggère que la peau est maintenue par un petit nombre de cellules souches contenues dans ces colonies – en d'autres termes, des cellules souches de l'épiderme qui ont été corrigées avec le gène de la laminine. Ainsi, la greffe a fourni un nouveau réservoir de cellules souches corrigées qui alimente l'épiderme de l'enfant et s'est maintenu jusqu'à aujourd'hui. Un résultat par ailleurs en faveur d'une idée longtemps débattue: la peau se régénérerait à partir non pas d'un grand nombre de cellules précurseurs de l'épiderme, mais d'un petit groupe de cellules souches spécialisées.

Certes, il s'agit à présent de suivre l'évolution à long terme de l'enfant pour s'assurer que sa peau reste stable. Ses muqueuses internes, par ailleurs, n'ont pas pu être traitées et restent très fragiles, notamment celle de l'œsophage. Néanmoins, depuis mars 2016, il est de retour à l'école. ■

**MARIE-NEIGE CORDONNIER**

T. Hirsch *et al.*, *Nature*, vol. 551, pp. 327-332, 2017; M. Aragona et C. Blanpain, *Nature*, vol. 551, pp. 306-307, 2017

## Comment ont évolué les inégalités de richesse

Une équipe dirigée par Timothy Kohler, de l'université d'État de Washington, et Michael Smith, de l'université d'État de l'Arizona, a étudié le développement des inégalités de richesse au fil des millénaires en comparant 63 sites archéologiques de divers endroits dans le monde et de diverses époques. Elle révèle que les inégalités se sont davantage marquées en Eurasie qu'en Amérique du Nord et en Mésoamérique. L'éclairage de Michelle Elliott.

Propos recueillis par MAURICE MASHAAL



**MICHELLE ELLIOTT**  
maître de conférences  
à l'université Paris 1  
Panthéon-Sorbonne  
(UMR 7041)

**Quelles régions et quelles époques l'échantillon de sites archéologiques étudié couvre-t-il ?**

Sont représentées l'Amérique du Nord, la Mésoamérique, l'Europe et l'Asie. Deux sites africains sont aussi inclus, l'un en Égypte et l'autre en Afrique du Sud. Sur le plan chronologique, cet échantillon s'étend sur les 9 millénaires avant notre ère pour l'Ancien Monde (à l'exception du site sud-africain, qui est actuel), et de 1000 avant notre ère jusqu'au xvii<sup>e</sup> siècle pour le Nouveau Monde.

**Timothy Kohler et ses collègues ont choisi, comme critère d'inégalités de richesse au sein d'une communauté, la variabilité de la taille des habitations. Pourquoi ?**

D'une part, c'est un paramètre bien visible dans les vestiges archéologiques ; d'autre part, les études ethnographiques et historiques ont montré que la taille d'une habitation est étroitement corrélée au niveau économique de ses occupants. Ainsi, les habitations tendent à être de la même taille dans les groupes où les individus ont à peu près le même niveau économique, alors qu'il y aura plutôt un mélange de grandes et petites maisons dans les groupes où certains individus sont plus riches que les autres. La variabilité de la taille des maisons est donc un indicateur assez universel des inégalités de richesse, qui s'applique à tous les sites. Il n'en est pas de même avec, par exemple, les objets contenus dans les tombes, parce qu'ils varient avec la culture et parce que les sépultures ne représentent qu'une partie des membres de la société.

**Comment les différents sites ont-ils été comparés ?**

À partir des données disponibles, Timothy Kohler et ses collègues ont calculé le « coefficient de Gini » associé

à la taille des habitations de chaque site. Ce coefficient statistique mesure la variabilité de cette taille ; il va de 0, si toutes les habitations sont de taille similaire (pas d'inégalités de richesse), à 1, si l'une d'elles est beaucoup plus grande que les autres (une personne monopolise toutes les richesses). Par ailleurs, la plupart des sites eurasiatiques étant plus anciens que les sites américains, les chercheurs ont établi une échelle de comparaison en classant les sites selon la durée écoulée depuis l'apparition de l'agriculture dans la région en question.

**Qu'en concluent-ils ?**

Comme on s'y attendait, les inégalités se révèlent plus fortes dans les sites d'agriculteurs que dans les sites de chasseurs-cueilleurs, et elles sont d'autant plus prononcées que la société a une grande population, une structure politique complexe ou un régime autoritaire. Plus surprenante est la constatation que, passé 2 500 années d'agriculture, le niveau des inégalités de richesse se stabilise dans les sites américains alors qu'il augmente sensiblement en Eurasie.

**Comment expliquer cette différence ?**

Selon Timothy Kohler et ses collègues, elle serait due à la présence en Eurasie – mais pas en Amérique – de grands animaux domestiques (bovins, chevaux...) capables de transporter des marchandises, de labourer des champs et de véhiculer des guerriers. Cela aurait favorisé la compétition au sein de la société et permis à certains d'acquérir plus de terres et de pouvoir, avec parfois la constitution d'une classe de paysans sans terre. L'hypothèse est intéressante, mais reste à prouver. L'étude des sociétés pastorales andines, qui disposaient de lamas et d'alpagas pour le transport de marchandises, mais pas pour labourer ou pour porter des cavaliers, serait un bon test. Il reste donc à compléter ces travaux inédits avec des sites plus nombreux, représentatifs de toutes les régions et toutes les périodes. ■

T. A. Kohler *et al.*, *Nature*, M. Elliott, *ibid.*, en ligne le 15 novembre 2017

## CLIMATOLOGIE

# COMMENT LE SAHARA VERT A DISPARU

Une équipe de climatologues a montré comment des changements de température dans l'hémisphère Nord ont provoqué une rapide aridification du Sahara il y a près de 5 000 ans.

Il y a entre 11 000 et 5 500 ans, le Sahara était couvert d'une végétation tropicale et de systèmes fluviaux. Mais à la fin de cette période, ce «Sahara vert» a connu une aridification très rapide qui a laissé place au désert que nous connaissons aujourd'hui. Une équipe internationale, dont fait partie Thibaut Caley, du laboratoire Epop (CNRS et université de Bordeaux), vient de montrer qu'une baisse des températures dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord a joué un rôle dans la disparition du Sahara vert.

Les conditions de la fin de cette période humide sont mal connues. Pour les clarifier, Thibaut Caley et ses collègues ont d'abord analysé des sédiments marins dans le golfe de Guinée, qui leur ont montré que les précipitations ont fortement diminué il y a entre 5 800 et 4 800 ans dans la région du Cameroun et dans le centre du Sahel-Sahara. Une constatation similaire ayant été faite dans le nord-est de l'Afrique, cela atteste d'un phénomène global.

Pour comprendre ce qui s'est passé, les chercheurs ont étudié les phénomènes atmosphériques qui influent sur l'apport d'humidité dans la région. Les sources d'humidité pour le Sahel et le Sahara sont l'océan Atlantique et la mousson en provenance d'Afrique centrale. Les volumes de précipitations, ainsi que leur caractère saisonnier, sont modulés par deux courants atmosphériques, le jet d'est tropical (TEJ) et le jet d'est africain (AEJ). Les conditions deviennent plus arides si le TEJ ralentit ou si l'AEJ se renforce.

Mais quel phénomène a pu perturber le TEJ et l'AEJ de façon à provoquer l'aridification du Sahara vert ? Il pourrait être à chercher dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord. En effet, de nombreux indicateurs suggèrent que, il y a 6 000 à 5 000 ans, les températures estivales dans la région s'étendant du Groenland à la mer de Norvège ont diminué. La conséquence, peut-être, d'un ralentissement des courants dans l'océan Atlantique qui ramènent de l'eau chaude et salée des basses latitudes vers le Nord (on parle de circulation thermohaline) ou d'une expansion du vortex polaire de l'hémisphère Nord, qui apporte du vent froid plus au Sud.

Pour comprendre comment ce phénomène a pu influencer sur les conditions climatiques au



Difficile d'imaginer que le Sahara, aujourd'hui désertique, présentait, il y a entre 11 000 et 5 500 ans, une végétation abondante et des rivières.

**10**  
FOIS PLUS DE PRÉCIPITATIONS QU'AUJOURD'HUI ARROSAIENT LE SAHARA DURANT SA PÉRIODE HUMIDE. EN MOYENNE, IL PLEUT DE NOS JOURS ENTRE 35 ET 100 MILLIMÈTRES D'EAU PAR AN DANS LA RÉGION. MAIS CETTE VALEUR PEUT ÊTRE NULLE DANS CERTAINES ZONES DITES HYPERARIDES.

Sahara, les chercheurs ont fait appel à un modèle numérique de climat qui reproduit les conditions de l'époque en imposant (ou non) un refroidissement, compris entre 0,5 °C et 2,5 °C, de l'Atlantique Nord. D'après ce modèle, les anomalies de température se sont manifestées jusqu'au nord de l'Afrique, ce qui a eu pour conséquence de ralentir le TEJ et de réduire ainsi les précipitations. Par ailleurs, la baisse des températures au sol dans le Sahara a aussi bloqué la montée vers le nord de la mousson, d'où une baisse des précipitations dans le Sahel. Les chercheurs ont aussi montré que ces conditions ont renforcé l'AEJ, qui accentue l'aridification.

Ainsi, une variation de température dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord a déclenché un effet en cascade, avec des rétroactions biogéophysiques qui ont conduit à la disparition du Sahara vert. De façon plus générale, souligne Thibaut Caley, «ces travaux confortent également l'hypothèse selon laquelle les changements futurs de température dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord pourraient avoir d'importantes répercussions sur le cycle hydrologique saharien et par conséquent sur les populations de cette région.» ■

SEAN BAILLY

J. A. Collins *et al.*, *Nature Communications*, vol. 8, article 1372, 2017

### MIEUX MODÉLISER LE BALLAST

Le ballast, sous les rails de chemin de fer, limite le tassement du sol dû au passage des trains. Mais il subit lui-même une usure par frottements. Régis Cottureau et ses collègues – des chercheurs du CNRS et des ingénieurs de la SNCF – ont développé un modèle qui décrit comment l'effort se répartit sur le ballast au passage des trains et l'influence de la vitesse de ces derniers. Une modélisation qui permettra de mieux gérer le ballast afin de renforcer les zones les plus exposées à l'usure.

### LES ÉCLAIRS, SOURCE D'ISOTOPES RADIOACTIFS

On sait qu'en bombardant l'atmosphère, les rayons cosmiques forment des éléments radioactifs, tel le carbone 14 utilisé pour la datation. En 1925, il avait été suggéré que les éclairs pouvaient aussi induire des réactions nucléaires et produire des isotopes radioactifs. Teruaki Enoto, de l'université de Kyoto, l'a confirmé en détectant des rayons gamma issus d'annihilations électron-positron, le positron étant un sous-produit d'une chaîne de désintégrations induite par un éclair.

### SUR LA PISTE DU SRAS

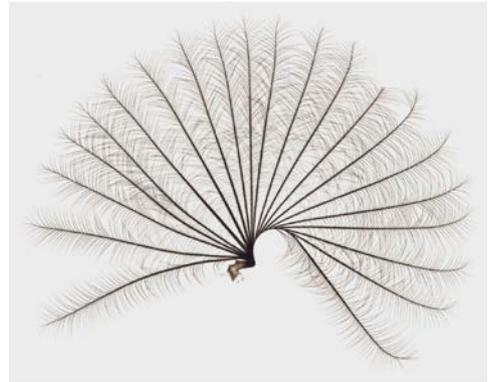
En 2003, une épidémie de syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS) a commencé en Chine et a fait plus de 600 morts dans le monde. Les chauves-souris du genre *Rhinolophus* sont suspectées d'être le réservoir du coronavirus responsable du SRAS. L'équipe de Jie Cui et Zheng-Li Shi, de l'Académie chinoise des sciences, semble confirmer cette hypothèse avec la découverte d'une population de 300 chauves-souris dans une caverne de la province du Yunnan portant diverses souches virales, qui, rassemblées présentent toutes les caractéristiques du virus du SRAS.

## DES POILS POUR PUNAISES D'EAU

Comment de nouvelles espèces émergent-elles? L'évolution par sélection naturelle est bien sûr à l'œuvre, mais les chercheurs continuent d'explorer les conditions génétiques et environnementales qui la sous-tendent. Dans cet esprit, Abderrahman Khila, de l'Institut de génomique fonctionnelle de Lyon, et son équipe viennent de faire un pas en avant en s'intéressant aux punaises aquatiques du genre *Rhagovelia*.

Parmi les 2000 espèces recensées de punaises d'eau, *Rhagovelia* a la particularité d'avoir, aux extrémités de sa deuxième paire de pattes, une structure en éventail qui, un peu comme une palme, lui permet de remonter aisément le courant. L'insecte peut ainsi exploiter les ressources situées au milieu des rivières.

D'où vient cette singularité? «Nous nous sommes rendu compte que l'espèce *Rhagovelia antileana* présente deux gènes dont l'expression est nécessaire pour que les pattes développent cet éventail», explique Abderrahman Khila. Le premier gène est commun à toutes les espèces de punaises d'eau. En revanche, le second n'apparaît que chez *Rhagovelia*. La forte ressemblance entre les deux gènes a permis aux chercheurs de déduire que le gène spécifique provenait d'une duplication du gène ancestral commun.



Cet éventail de poils au bout des pattes est spécifique aux punaises d'eau du genre *Rhagovelia*.

Autre constat, les deux gènes sont actifs uniquement à l'extrémité de la patte de *Rhagovelia*. Chez les autres espèces, le gène commun semble n'être actif nulle part durant la croissance de l'embryon. «C'est un cas rare où deux gènes, un gène nouveau et un autre inactif, sont responsables du développement et de l'évolution d'une nouvelle structure», se réjouit le chercheur. En général, les spécificités des espèces sont dues à des mutations sur des gènes existants, ayant déjà un autre rôle. L'équipe étudie maintenant comment fonctionne le réseau de gènes à l'origine de la mise en place de ces éventails et notamment comment les nouveaux gènes y participent. ■

DONOVAN THIEBAUD

M. E. Santos *et al.*, *Science*, vol. 358, pp. 386-390, 2017

## CURIEUX APPÉTIT DE LIMACE DE MER

L'espèce de nudibranches *Cratena peregrina* a un comportement de prédation particulier, ont constaté Trevor Willis, de l'université de Portsmouth, au Royaume-Uni, et ses collègues. Ces limaces de mer sont friandes d'hydrozoaires, des animaux qui appartiennent au même embranchement que les anémones de mer, les méduses et les coraux. Le plus souvent, les hydrozoaires vivent en colonies sous la forme de polypes qui se nourrissent de plancton. Non seulement les nudibranches mangent les polypes, mais ils choisissent de préférence ceux qui viennent de consommer du plancton.

Pour le découvrir, les biologistes, en laboratoire, ont mis des nudibranches en présence de polypes remplis de plancton et d'autres «vides». Les attaques des nudibranches étaient plus nombreuses sur les polypes repus.



*Cratena peregrina* préfère se nourrir de proies qui ont elles-mêmes déjà mangé plutôt que de proies à jeun.

On connaissait déjà le cleptoparasitisme qui désigne la consommation d'une proie volée à son prédateur. Les chercheurs ont forgé un mot pour décrire le comportement du nudibranche observé pour la première fois: la cleptoprédation. La cleptoprédation consiste à consommer à la fois la proie et le repas de cette dernière! ■

ALINE GERSTNER

T. J. Willis *et al.*, *Biology Letters*, vol. 13, 20170447, 2017

## EN IMAGE

# DES CRISTAUX LIQUIDES DANS TOUS LEURS ÉTATS

**L**es cristaux liquides sont au cœur des écrans de la plupart de nos tablettes, téléphones ou ordinateurs et ont de nombreuses applications; ils seront peut-être demain utilisés dans des capteurs biologiques ou des métamatériaux. Leurs intéressantes propriétés optiques sont dues à la forme longiligne de leurs molécules, qui tendent à s'aligner les unes par rapport aux autres, même si elles peuvent adopter de nombreuses configurations différentes.

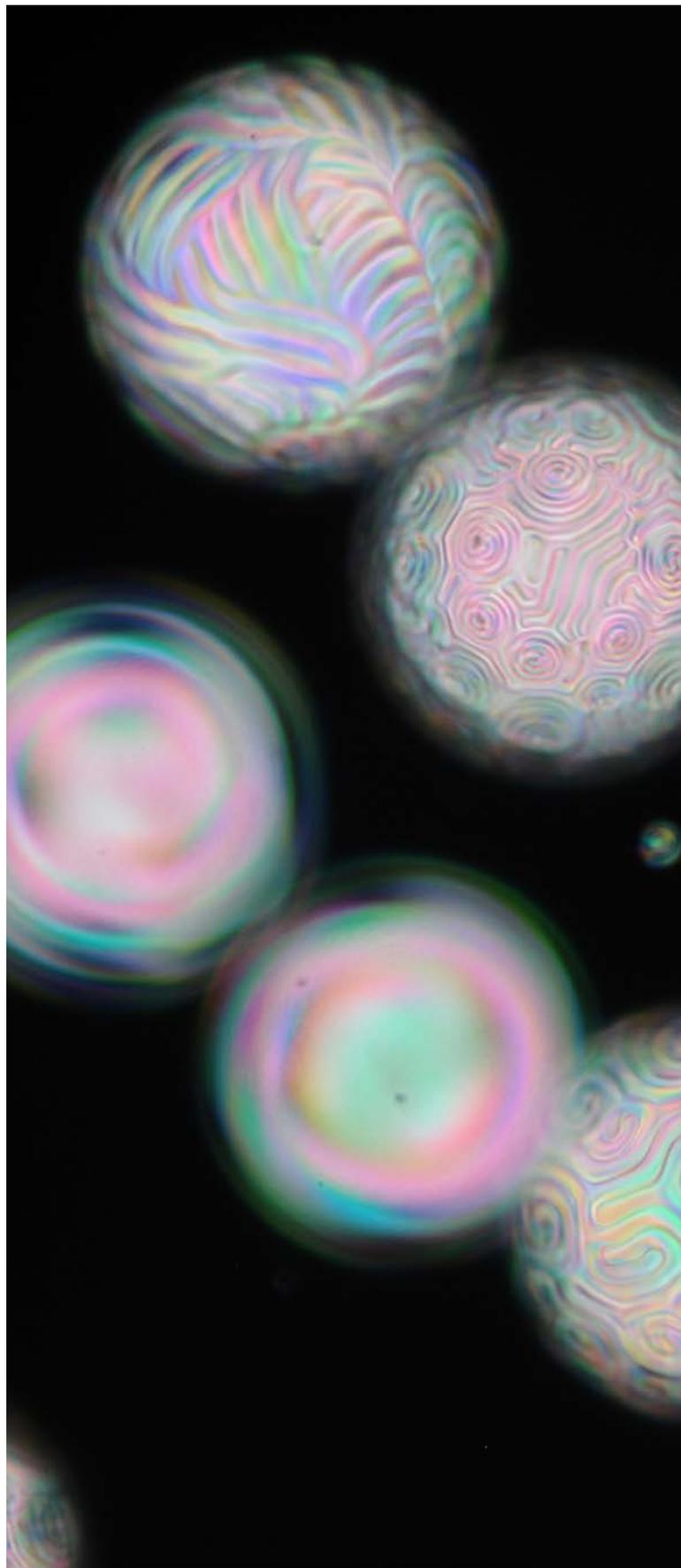
Pour mieux comprendre et étudier ces configurations ainsi que les transitions de l'une à l'autre d'entre elles, Guillaume Durey et Teresa López-León, chercheurs à l'ESPCI, à Paris, ont développé, avec des collègues de l'université de Pennsylvanie, un dispositif qui permet de produire une vaste gamme d'organisations des cristaux liquides.

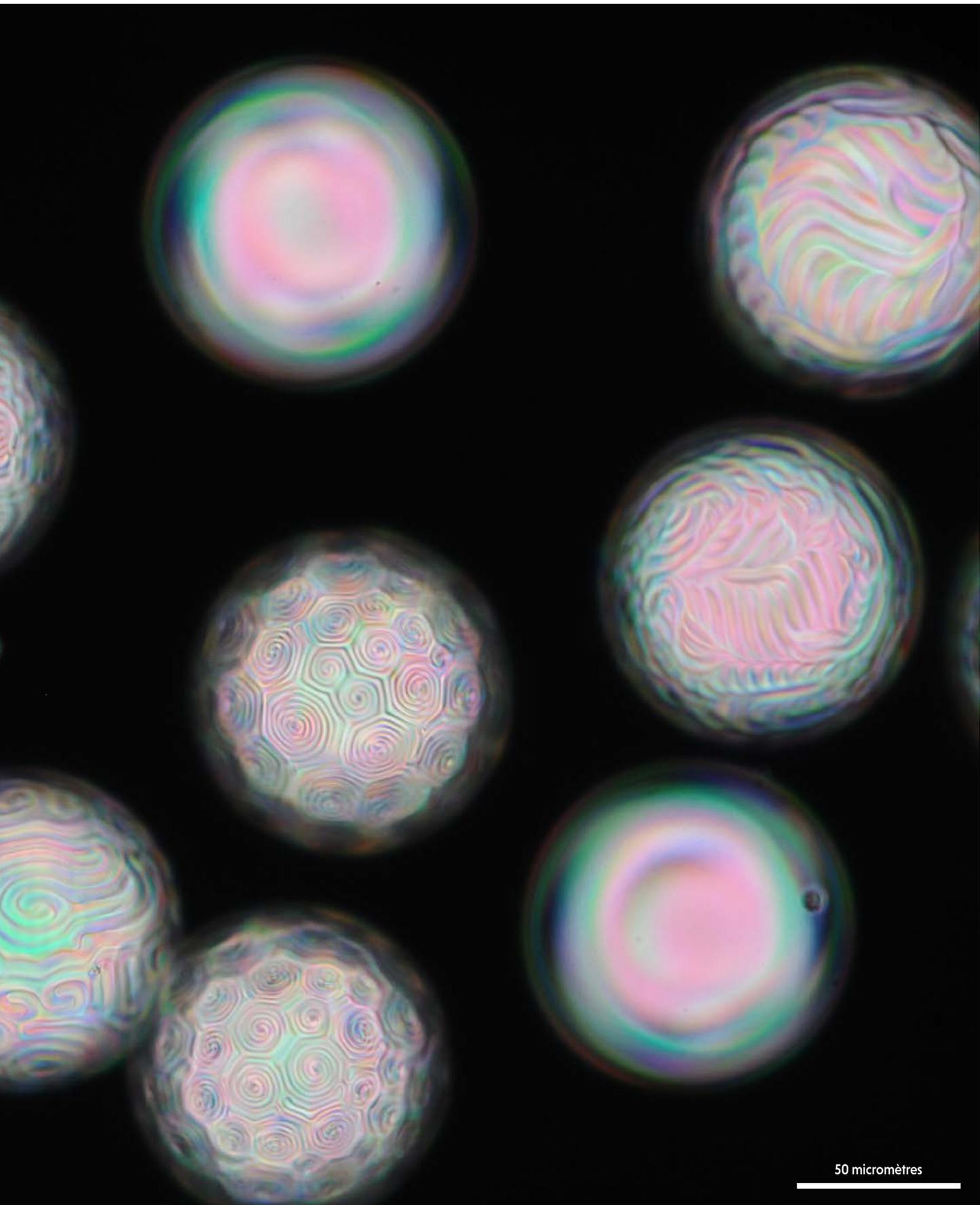
Grâce à des techniques microfluidiques, l'équipe fabrique des coques au sein desquelles le liquide étudié est confiné entre deux sphères concentriques. Les molécules du cristal liquide s'orientent perpendiculairement aux interfaces avec la coque. Que se passe-t-il lorsqu'il s'agit d'un cristal liquide cholestérique, dont les molécules tendent normalement à s'agencer en hélice? Les contraintes liées aux interfaces et à la géométrie de la coque empêchent ces molécules de former des hélices. Les molécules sont alors dites frustrées et s'organisent selon des configurations complexes.

Les chercheurs contrôlent ces dernières en ajustant certains paramètres tels que l'épaisseur de la coque ou la présence d'un agent tensioactif sur les surfaces internes de la coque, à l'interface avec le liquide. En faisant varier ces paramètres, les physiciens ont aussi observé la transition entre configurations différentes. L'image ci-contre montre plusieurs coques vues au microscope optique en lumière polarisée. Guillaume Durey et ses collègues ont obtenu ces trois types de structures – lisses, à bandes larges ou étroites – en augmentant la concentration de l'agent tensioactif aux interfaces coque-cristal liquide. ■

S. B.

L. Tran *et al.*, *Phys. Rev. X*, vol. 7, 041029, 2017





© Guillaume Durey

PHYSIQUE

## DES PHOTONS FONT LA PAIRE

**D**ans un matériau supraconducteur, les électrons forment des paires dites de Cooper, qui circulent dans le matériau sans rencontrer de résistance. Ce phénomène a de nombreuses applications, notamment pour la fabrication d'aimants puissants. André Saraiva, de l'Institut de physique à Rio de Janeiro, et ses collègues ont mis en évidence un équivalent des paires de Cooper avec des photons.

L'existence des paires de Cooper est contre-intuitive, car deux électrons, chargés négativement, se repoussent par la force électrostatique de Coulomb. Mais John Bardeen, Leon Cooper et John Schrieffer ont montré en 1957 que les interactions des électrons avec la matière environnante peuvent créer des forces attractives qui prennent le dessus sur la répulsion coulombienne et grâce auxquelles les paires se forment. Quelle est la nature de ces forces? En circulant, les électrons déforment le réseau cristallin du matériau et le font vibrer. La physique quantique montre que ces vibrations peuvent être considérées comme des quasi-particules nommées phonons, et c'est l'interaction électrons-phonons qui est à l'origine de l'appariement.

Qu'en est-il pour les photons? Ils peuvent interagir avec les atomes par divers processus, telle la diffusion Raman. Dans ce type de

diffusion, l'atome absorbe un photon puis en réémet un autre avec un peu plus – ou un peu moins – d'énergie que le photon initial (l'atome, en se désexcitant, revient alors à un état quantique d'énergie légèrement différente de celle d'avant l'absorption du photon). Les physiciens brésiliens ont montré théoriquement que deux photons d'énergie égale pouvaient procéder à une sorte de double diffusion Raman, l'un ressortant avec un peu plus d'énergie, l'autre un peu moins. L'échange se ferait par l'intermédiaire des vibrations (les phonons) du milieu traversé et pourrait engendrer une force attractive entre les photons, qui formeraient une paire. Dans ce processus *a priori* très rare, les caractéristiques des deux photons seraient fortement corrélées.

Pour mettre en évidence ce phénomène, les physiciens ont mesuré des corrélations en énergie sur des photons de faisceaux laser qui traversent des milieux transparents (eau, propanol, etc.). Ils ont observé plus de paires corrélées qu'ils n'auraient pu en voir si le seul hasard était à l'œuvre. Si ce résultat est confirmé, les chercheurs imaginent déjà des applications à ces paires de photons, par exemple des sources de photons intriqués. ■

S. B.

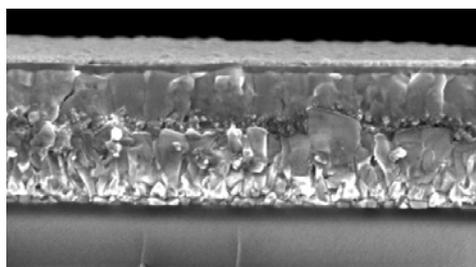
A. Saraiva *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119, 193603, 2017

ÉNERGIE

## UNE CELLULE SOLAIRE STABLE

**D**écouvertes depuis moins de dix ans, les cellules solaires à pérovskites suscitent un engouement justifié à la fois par la progression de leur rendement (passé de 3,8% à 22,7%, il se rapproche de celui des meilleures cellules au silicium) et par la simplicité de leur fabrication. Mais les meilleures cellules à pérovskite sont à la fois trop chères et trop peu stables dans les conditions réelles d'utilisation.

Les cellules photovoltaïques à pérovskite sont structurées en couches. On obtient les meilleurs rendements avec certains dopants tels que le spiro-OMeTAD, mais les dispositifs résultants sont sensibles à l'ensoleillement et à la température. Et le prix prohibitif du spiro-OMeTAD rend son utilisation à large échelle impensable. L'équipe de Michael Graetzel, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, l'a remplacé par



Coupe de la cellule photovoltaïque à base de thiocyanate de cuivre, observée au microscope électronique.

du thiocyanate de cuivre, un dopant beaucoup plus stable et très peu onéreux. En ajoutant également une couche intercalaire d'oxyde de graphène réduit, les chercheurs ont obtenu une cellule qui conserve son rendement de 20% après 1000 heures d'illumination à une température de 60°C. Mais une solution reste à trouver pour que la cellule résiste à l'air ambiant. ■

MARTIN TIANO

N. Arora *et al.*, *Science*, vol. 358, pp. 768-771, 2017

EN BREF

### EDITH HEARD, GRAND PRIX DE L'INSERM 2017

**P**rofesseure au Collège de France, Edith Heard est à la tête de l'unité mixte de recherche de génétique et biologie du développement à l'Institut Curie, à Paris. C'est une éminente spécialiste de l'épigénétique, l'étude des mécanismes (moléculaires) qui modulent l'expression des gènes sans modifier leur séquence. Elle a notamment travaillé sur l'inactivation du chromosome X. Elle est aussi très impliquée dans le programme *Pause*, piloté par le Collège de France, qui vise à l'accueil en urgence de scientifiques en exil, en provenance de pays où la situation politique est critique. (En 2019, elle prendra la tête de l'EMBL, le laboratoire européen de biologie moléculaire, à Heidelberg.)



### MIEUX ESTIMER LA MAGNITUDE D'UN SÉISME

**L**ors d'un tremblement de terre, de grandes quantités de matière sont déplacées, ce qui modifie le champ de gravité. Les perturbations associées se propagent à la vitesse de la lumière (alors que les signaux sismiques se propagent à des vitesses comprises entre 3 et 10 kilomètres par seconde). Martin Vallée, de l'Institut de physique du globe de Paris, et ses collègues ont extrait les signaux liés aux perturbations de gravité des données des sismomètres lors du séisme de Tohoku, au Japon, en 2011. Ils ont montré que ces signaux donnent une meilleure estimation de la magnitude que l'analyse des ondes sismiques.

## ASTROPHYSIQUE

## PULSARS ET POSITRONS

**D**epuis 2009, des expériences spécialisées dans les rayons cosmiques (*Pamela* et *AMS*) ont mis en évidence un excès de positrons par rapport à ce que prévoyaient les modèles. Deux hypothèses ont été avancées: les positrons sont produits par l'annihilation de particules de matière noire, ou ils sont émis par des pulsars (des étoiles à neutrons en rotation rapide dotées d'un fort champ magnétique). L'observatoire de rayons cosmiques *HAWC*, au Mexique, a étudié le rayonnement gamma émis par les deux pulsars les plus proches. Les résultats confirment que les pulsars sont bien des sources de positrons (ces derniers produisent des rayons gamma en s'annihilant avec des électrons du milieu environnant). Mais les deux pulsars proches sont-ils à l'origine de l'excès de positrons observé? La question reste débattue. ■

S. B.

A. U. Abeysekara *et al.*, *Science*, vol. 358, pp. 911-914, 2017

## BIOLOGIE ANIMALE

## LE SON DE L'AILE DU PIGEON

**L**orsqu'un oiseau s'envole rapidement en cas de danger, ses congénères le suivent. Certains oiseaux lancent un cri d'alarme, mais ce n'est pas toujours le cas. Le mouvement d'envol ou le bruit des ailes sert-il alors de signal? D'après Trevor Murray, de l'université australienne de Canberra, et ses collègues, un bruit caractéristique des ailes peut être interprété comme un signal de danger, au moins dans le cas de la colombine long-gup (*Ocyphaps lophotes*), un pigeon australien.

Les chercheurs ont montré que la huitième plume primaire de ce pigeon engendrait deux sons, l'un à 1,3 kilohertz lorsque les ailes montent, et l'autre à 2,9 kilohertz lorsque les ailes descendent. Le cycle de notes est répété au rythme des battements d'ailes. Les chercheurs ont enregistré cette séquence et l'ont jouée à des pigeons en modulant la vitesse. Si le son est joué normalement, les oiseaux s'envolent; s'il est ralenti (comme si l'oiseau s'envolait en absence de danger), les oiseaux ne s'enfuient pas. ■

S. B.

T. G. Murray *et al.*, *Current Biology*, vol. 27, pp. 3520-3525, 2017

## ARCHÉOLOGIE

## UN TRÉSOR RETROUVÉ À CLUNY

Ces 21 dinars ont été frappés au XII<sup>e</sup> siècle dans l'empire almoravide, dont le territoire allait du Maroc à l'Andalousie.



**U**ne cornaline gravée en creux sertie dans une bague en or pour former un sceau constitue sans doute l'objet le plus précieux du trésor qui vient d'être découvert dans l'abbaye de Cluny. Anne Baud et Anne Flammin, du laboratoire Archéologie et archéométrie, à Lyon, recherchaient les fondations de l'ancienne infirmerie de la célèbre abbaye de Saône-et-Loire quand un membre de leur équipe aperçut une pièce d'argent dans le sol. L'alerte donnée, une fouille prudente à la main ramena au jour plus de 2200 deniers et oboles d'argent frappés par l'abbaye. Ces monnaies avaient été enterrées dans un sac de toile, qui contenait aussi un petit paquet de peau tannée et nouée protégeant une feuille d'or pliée de 24 grammes, un petit objet circulaire en or, la bague sigillaire mentionnée plus haut et 21 dinars en or frappés entre 1121 et 1131 en Espagne et au Maroc, donc au sein de l'empire berbère almoravide.

Ce trésor date manifestement de la première moitié du XII<sup>e</sup> siècle, période pendant laquelle l'abbaye était encore à son apogée, mais commençait à avoir des difficultés financières, notamment à la suite de la construction de Cluny III, une nouvelle église abbatiale qui a été la plus grande d'Occident.

Qui l'a dissimulé? Dans la mesure où il contient des deniers d'argent frappés à Cluny, il est possible qu'il ait été caché par l'administrateur général de l'abbaye, le moine cellérier. Les prochaines recherches devraient toutefois permettre d'avancer d'autres hypothèses sur l'origine d'un trésor qui semble par ailleurs intégrer une partie de la rente en or que les rois de Castille avaient consentie à l'abbaye (300 pièces d'or annuelles, puis 200 au milieu du XII<sup>e</sup> siècle). Quoi qu'il en soit, avec ses dinars almoravides, le trésor de Cluny illustre bien la quasi-absence d'émission monétaire en or au Moyen Âge en Occident chrétien. Il faudra attendre que Florence, en 1252, batte ses premiers florins pour que les émissions d'or reprennent véritablement en Europe. ■

FRANÇOIS SAVATIER

<http://www.arar.mom.fr/recherche-et-activites/axes-de-recherche/equipe-3/abbaye-de-cluny-2015-2018/tresor-medieval-a-abbaye-de-cluny>

## PALÉONTOLOGIE

# LES PTÉROSAURES PONDAIENT EN COLONIE

La découverte en Chine de plus de 200 œufs de ces reptiles volants livre des informations sur la nidification des ptérosaures et le développement des juvéniles.

**D**u Trias supérieur à la fin du Crétacé supérieur (de 230 millions à 66 millions d'années), le danger pouvait venir du ciel sous la forme de ptérosaures, dont l'envergure atteignait 10-11 mètres chez certains. Ces reptiles volants avaient de grandes ailes composées de membranes fixées au quatrième doigt, particulièrement allongé, des pattes antérieures. De cet ordre disparu, les paléontologues ont retrouvé de nombreux fossiles partout dans le monde. Mais il n'en est pas de même de leurs œufs : moins d'une dizaine avaient été retrouvés en Argentine et en Chine. On connaissait donc très mal les premiers stades de la vie de ces animaux. Or Xiaolin Wang, de l'Académie chinoise des sciences, à Pékin, et ses collègues viennent de découvrir, pris dans un bloc de grès, un ensemble de 215 œufs de ptérosaures appartenant à l'espèce *Hamipterus tianshanensis*.

Le nombre exceptionnel d'œufs et leurs tailles variables suggèrent qu'ils ont été pondus par différentes femelles sur un même site. Les ptérosaures auraient donc eu un comportement grégaire, au moins pour ce qui est de la ponte. On retrouve ce comportement par exemple chez les tortues luth qui viennent déposer leurs œufs en groupe sur certaines plages.

L'aspect désordonné et l'accumulation des œufs indiquent qu'il y a eu transport de ces derniers. Après avoir analysé la composition et la structure de la roche dans laquelle sont pris les œufs, les chercheurs suggèrent qu'un événement violent tel qu'un fort orage a pu s'abattre sur la zone de nidification et provoquer le déplacement des œufs, qui se sont accumulés avant d'être ensevelis.

Les œufs fossilisés présentent des plis et des déformations indiquant que l'enveloppe était souple, comme les œufs des lézards actuels qui sont dépourvus d'une coquille rigide de carbonate de calcium. Or de tels œufs doivent être déposés dans un substrat humide pour ne pas sécher, ce qui entraînerait la mort de l'embryon. Ainsi, les œufs étaient probablement enterrés dans le sol ou cachés sous un amas de végétaux, mais, du fait du déplacement des œufs par l'orage, les fouilles ne permettent pas de le



Près de 200 œufs de ptérosaures ont été découverts dans un bloc de grès en Chine. Des os d'adultes ont également été retrouvés, ce qui laisse penser que les parents protégeaient les nids.

certifier, ni de dire combien d'œufs par couvée une femelle pondait.

Seize œufs contenaient des restes d'embryons. Xiaolin Wang et ses collègues ont réalisé une reconstruction tridimensionnelle des os pour les étudier. Aucun embryon n'est complet : le mieux préservé contient une aile partielle, des os du crâne et la mâchoire inférieure. Les chercheurs ont constaté que les os des ailes étaient moins développés que les fémurs. Cela suggère qu'au moment de l'éclosion, les ptérosaures étaient probablement capables de se déplacer au sol, mais pas de voler. Une autre observation est que les mâchoires des embryons étaient dépourvues de dents. L'animal nouveau-né ne pouvait donc probablement pas se nourrir seul, ce qui impliquerait une présence parentale.

Mais il est difficile de savoir si les embryons retrouvés étaient quasiment à terme ou beaucoup plus jeunes. Et par comparaison, les dents des crocodiles apparaissent dans les derniers stades de croissance de l'embryon. Il est donc trop tôt pour conclure sur ces aspects du développement des ptérosaures juvéniles. La découverte de ce gisement d'œufs fossilisés n'en est pas moins exceptionnelle. ■

S. B.

X. Wang *et al.*, *Science*, vol. 358, pp. 1197-1201, 2017

### POURQUOI LE POISSON-PERROQUET A LA DENT DURE

Les poissons-perroquets mangent beaucoup d'algues coralliennes, qu'ils dégagent du corail en broyant celui-ci avec leurs dents. Ces dernières, qui s'usent et poussent continuellement, doivent donc être d'une extrême dureté. Matthew Marcus a révélé leur structure grâce aux rayons X du synchrotron de Berkeley ; et montré que des cristaux de fluoroapatite (calcium fluorophosphate) longs de 0,1 micromètre et larges de plusieurs micromètres, imbriqués en faisceaux, sont à l'origine de la dureté des dents de ces jolis poissons.

### LE « TOMBEAU DU CHRIST » DATE DE CONSTANTIN

Un sanctuaire bâti au sein de l'église du Saint-Sépulcre, à Jérusalem, est censé être le tombeau où aurait reposé le Christ trois jours avant de ressusciter. Lors de sa récente rénovation, une dalle oubliée, maintenue par du mortier, y a été découverte. La datation de ce mortier a révélé qu'il est du milieu du IV<sup>e</sup> siècle, donc de l'époque de Constantin. Or c'est bien ce premier empereur chrétien qui envoya un architecte afin de retrouver, d'après la tradition orale, ledit « tombeau du Christ ».

### PUNAISE À ÉCHANGEUR DE CHALEUR

Comment *Rhodnius prolixus*, une punaise suceuse de sang, peut-elle ingérer jusqu'à dix fois son poids de sang chaud sans mourir d'hyperthermie ? Sa tête est équipée d'un échangeur de chaleur élaboré qui refroidit le sang ingéré, ont découvert Claudio Lazzari, à l'université de Tours, et ses collègues. En l'absence de ce dispositif, le stress thermique serait fatal à l'insecte : ramené à notre échelle, il équivaut à une prise de 600 litres de soupe à 60 °C !

## UN LIQUIDE DE SPINS QUANTIQUE

Les propriétés magnétiques des matériaux dépendent de l'alignement et de l'interaction des moments magnétiques des atomes, c'est-à-dire de leurs spins. Une configuration particulière conduit à ce qu'on nomme un liquide de spins quantique, dont un exemple vient d'être synthétisé en laboratoire.

Dans un matériau antiferromagnétique, la configuration stable, de plus basse énergie, est obtenue quand les spins voisins pointent dans des directions opposées. Mais la géométrie du réseau cristallin peut rendre impossible l'obtention d'une telle configuration stable. On dit alors que les spins sont frustrés.

Dans ce cas, il existe plusieurs configurations de spins qui ont l'énergie minimale, et on peut passer de l'une à l'autre en changeant l'orientation de quelques spins, à énergie constante. Le système de spins est dans ce cas instable : il est dépourvu d'« ordre magnétique ». Les spins fluctuent comme dans un état liquide, et cela même à des températures proches du zéro absolu. Dans ce cas, on parle de liquide de spins quantique.

Quelques exemples de liquides de spins quantiques existent dans la nature, et d'autres ont été synthétisés en laboratoire. Pour en créer de nouveaux, le physicien Alexei Kitaev, de Caltech, a proposé d'utiliser une configuration en nid d'abeille. En 2010, on a découvert deux iridates qui suivent ce modèle, l'iridate de sodium

$\text{Na}_2\text{IrO}_3$  et l'iridate de lithium  $\text{Li}_2\text{IrO}_3$ . Dans les deux cas, les atomes d'iridium forment la structure en nid d'abeille et les atomes de sodium ou de lithium sont au centre des hexagones. Cependant, au-dessous de 15 kelvins, ces matériaux montrent un ordre antiferromagnétique.

Fazel Tafti, du Boston College, et son équipe ont observé, par une analyse aux rayons X, que la structure hexagonale n'est pas parfaite : les angles ne font pas exactement  $120^\circ$ , mais sont compris entre  $114,9^\circ$  et  $124,2^\circ$ . C'est cette imperfection qui fait émerger l'ordre antiferromagnétique au-dessous de 15 kelvins.

La déformation du réseau est due à la taille relativement grande des atomes de sodium et de lithium (0,18 et 0,145 nanomètre de rayon). Les chercheurs ont donc substitué (par chauffage) les atomes de sodium par du cuivre, dont le rayon atomique est de 0,135 nanomètre. Les déformations du réseau étaient plus faibles, avec des angles compris entre  $118,7^\circ$  et  $122,5^\circ$ , et l'iridate de cuivre se comporte comme un liquide de spins au-dessus de 2,7 kelvins. En deçà, un faible ordre magnétique apparaît. Ce matériau présente donc une frustration plus importante que les deux autres iridates, ce qui le rapproche d'un liquide de spins quantique à la Kitaev. ■

S. B.

M. Abramchuk et al., *Journal of the American Chemical Society*, vol. 139(43), pp. 15371-15376, 2017

## UNE FOURMI MARIONNETTE

Au cours de l'évolution, certains parasites ont acquis une capacité à manipuler le comportement de leurs hôtes. Cette capacité passe en général par l'infection du cerveau de leurs victimes. De façon étonnante, le champignon parasite *Ophiocordyceps unilateralis* pourrait contrôler son hôte, la fourmi charpentière, en envahissant ses muscles et non son cerveau.

L'équipe de David Hughes, de l'université de Pennsylvanie, a montré qu'après 16 à 25 jours d'infection, l'agrégation de cellules fongiques pousse l'hôte à se fixer avec ses mandibules à une plante et à mourir à un endroit favorable au développement et à la dispersion des champignons. Le champignon établit des connexions entre cellules musculaires par des prolongements mycéliens, qui forment un réseau dense



Une fourmi, sous le joug d'un champignon, se fixe à une branche avant de mourir et permettre la diffusion des spores.

autour des muscles de l'hôte et en leur sein. Cette invasion provoque une atrophie qui relâche les fibres musculaires. Le champignon agirait ainsi comme un marionnettiste, en jouant directement sur les muscles des pattes et des mandibules. ■

NOËLLE GUILLON

M. A. Frederickson et al., *PNAS*, vol. 114, pp. 12590-12595, 2017

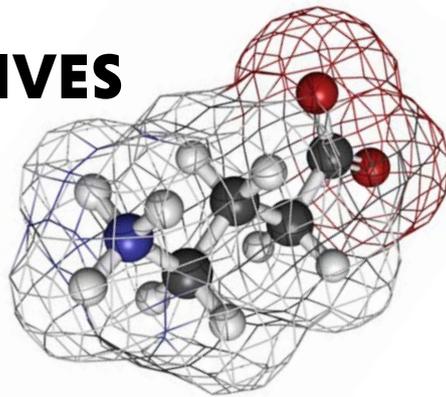
NEUROSCIENCES

# LE GABA EFFACE LES IDÉES INTRUSIVES

**V**ous êtes couché, mais ne trouvez pas le sommeil, car vous ruminez certains événements de la journée. Ces souvenirs intrusifs tournent en boucle dans votre cerveau. Comment supprimer ces idées noires? À l'université de Cambridge, en Angleterre, l'équipe de Michael Anderson a identifié une molécule et un mécanisme qui pourraient remplir cette fonction dans notre cerveau.

Les souvenirs intrusifs et autres ruminations sont parfois caractéristiques de divers troubles mentaux: schizophrénie, dépression, anxiété ou encore syndrome de stress post-traumatique. Pour bloquer ces processus mentaux indésirables, le cortex préfrontal latéral, à l'avant du cerveau, joue un rôle majeur: il contrôle et inhibe l'activité de nos souvenirs quand c'est nécessaire. Mais les patients ayant des pensées obsessionnelles présentent aussi souvent une hyperactivité de l'hippocampe, le centre cérébral de la mémoire. Les chercheurs ont supposé qu'un manque d'inhibition de l'hippocampe provoquerait un excès de pensées indésirables.

Or le GABA, un neurotransmetteur libéré par des interneurons présents dans presque toutes les régions cérébrales, est la molécule inhibitrice par excellence. Les chercheurs ont montré que des patients arrivaient à inhiber le



Une représentation du neurotransmetteur GABA, ou acide  $\gamma$ -aminobutyrique.

souvenir d'un mot, appris au préalable en association avec un second mot, quand on le leur demandait, et ce d'autant mieux que les concentrations de GABA dans leur hippocampe étaient élevées, celui-ci étant alors moins actif. Parallèlement, le cortex préfrontal était plus actif lors du contrôle des pensées.

Il existe ainsi un contrôle inhibiteur entre le cortex préfrontal et l'hippocampe. Sera-t-il un jour possible d'augmenter les taux de GABA dans l'hippocampe pour contrôler les souvenirs indésirables, notamment chez les patients souffrant de maladies mentales? ■

**BÉNÉDICTE SALTHUN-LASSALLE**

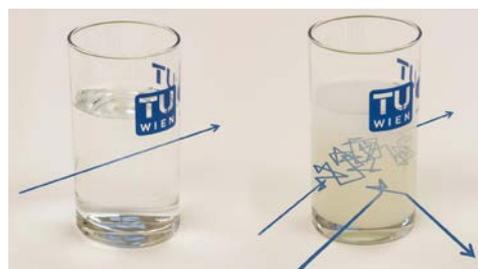
T. W. Schmitz *et al.*, *Nature Communications*, vol. 8, article 1311, 2017

PHYSIQUE

# LA CONSTANCE DE LA LUMIÈRE

**Q**ue la lumière traverse un verre rempli d'eau ou de lait, la longueur moyenne du parcours d'un rayon lumineux est identique dans les deux cas. Ce résultat contre-intuitif avait été prévu théoriquement en 2014. Une équipe parisienne vient de le montrer expérimentalement.

Dans de l'eau transparente et homogène, les photons traversent en ligne droite. S'ils traversent du lait, ils diffusent sur les petites particules de lipides et glucides présentes. Ils ressortent alors après un trajet très court ou très long. En moyenne, la longueur de ce trajet est égale à celle du trajet dans l'eau. Sylvain Gigan, du laboratoire Kastler-Brossel, à Paris, et ses collègues l'ont montré en s'appuyant sur les propriétés ondulatoires de la lumière. Ils ont étudié les interférences des



La longueur moyenne des parcours de la lumière dans un milieu trouble est identique à celle mesurée dans l'eau transparente.

ondes lumineuses qui ressortent après avoir traversé le milieu diffusant. Les chercheurs en ont déduit le nombre d'éléments diffusants rencontrés sur chaque chemin emprunté et la longueur de ce chemin. Ils ont ainsi prouvé que la longueur moyenne du parcours est identique quelles que soient les concentrations et tailles des particules du milieu. ■

**D. T.**

R. Savo *et al.*, *Science*, vol. 358, pp. 765-768, 2017

EN BREF

**UN MIQVEH AU SUD**

**A** Saint-Paul-Trois-Châteaux, dans le sud de la Drôme, à proximité d'une « rue juiverie », les archéologues de l'Inrap étudient une construction voûtée où se trouve une résurgence d'eau souterraine. Cette source semble avoir fourni l'eau d'un miqveh, bain rituel juif dévolu aux ablutions purificatrices. Au début du xv<sup>e</sup> siècle, Saint-Paul-Trois-Châteaux était l'un des rares endroits de la France médiévale où une communauté juive pouvait s'épanouir, tranquillité qui n'a guère duré.

**LE YÉTI, UN OURS ?**

**D**es restes censés provenir du mythique yéti correspondent-ils à l'ours polaire, comme certains l'ont proposé ? Pour tester cette hypothèse, Charlotte Lindqvist, de l'université de Buffalo, et des collègues ont conduit une étude phylogénétique et cladistique à partir des ADN contenus dans 24 échantillons attribués au yéti. Conclusion : tous proviennent soit de l'ours brun himalayen (*Ursus arctos isabellinus*), soit de l'ours brun tibétain (*U. a. pruinosus*), deux sous-espèces nées de l'isolement, dans la montagne, de populations d'ours bruns.

**UN LÉZARD PLACENTAIRE**

**C**hez les mammifères, la formation du placenta est possible grâce à des syncytines, des protéines produites par des gènes d'origine rétrovirale. Or les femelles du mabouya, un lézard andin, ont elles aussi un placenta. Une équipe coordonnée par Thierry Heidmann, du CNRS, vient de montrer que les ancêtres du mabouya ont eux aussi intégré un gène de syncytine il y a quelque 25 millions d'années. Comme chez les mammifères, ce gène a permis l'acquisition d'un placenta très proche de celui des mammaliens. Un étonnant cas de convergence évolutive.

MÉDECINE

## HPV: VACCINER LES GARÇONS?

**L**e principal facteur de risque des cancers du col de l'utérus est la survenue d'infections persistantes dues à certains papillomavirus humains (HPV). Des vaccins sont disponibles depuis 2006 contre les principales formes de ces virus, mais en France comme dans la plupart des pays, ils ne sont recommandés que chez les jeunes filles. Depuis 2013, certains pays les préconisent également pour les garçons, car, par «immunité grégaire», la protection bénéficie à ceux qui ne sont pas vaccinés.

Pour le vérifier, l'équipe de Matti Lehtinen, de l'institut Karolinska, en Suède, a réalisé un essai clinique auprès de 80 000 personnes. Même avec une couverture vaccinale minimale des hommes, la protection globale des femmes est meilleure. Cependant, pour certains types de HPV, la couverture devrait atteindre 80% pour être efficace. ■

M. T.

M. Lehtinen et al., *Int. J. Cancer*, en ligne, 9 novembre 2017

CHIMIE

## UN ANTIGEL DE SYNTHÈSE

**L**a cryoconservation de cellules pour la biologie ou la médecine consiste à les conserver à la température de l'azote liquide, -196 °C. Cependant, comme les cellules tendent à exploser, on utilise des solutions cryoprotectrices, tel le DMSO. Mais ces composés sont toxiques pour les cellules; et si on diminue leur concentration, on réduit la survie. Autre problème: il faut limiter la formation de cristaux de glace qui déchirent les membranes cellulaires.

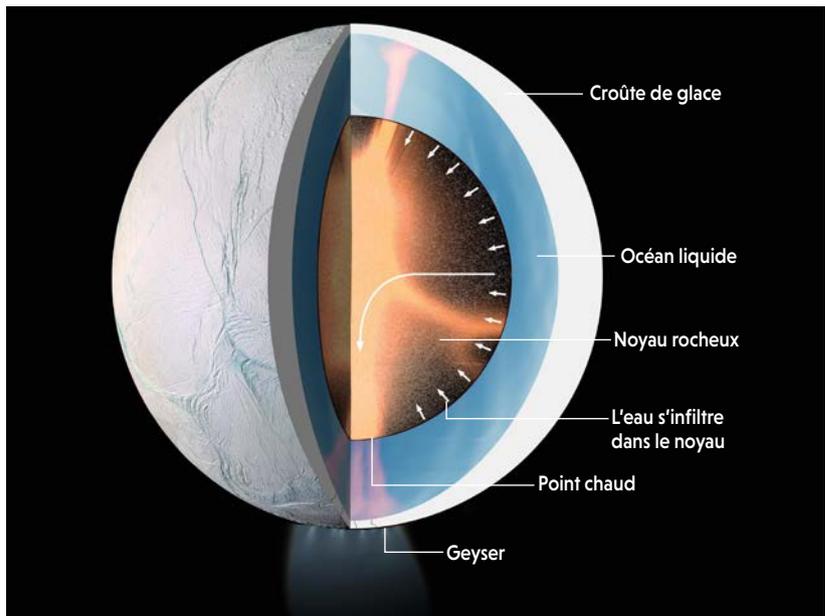
Avec notamment des collègues de l'université de Warwick, Sylvain Deville, du Laboratoire de synthèse et fonctionnalisation des céramiques (CNRS/Saint-Gobain), à Cavaillon, a étudié la polyproline, molécule dont la structure hélicoïdale est comparable à celle de protéines antigels naturelles. Ces chercheurs ont confirmé que, ajoutée au DMSO, elle améliore la cryoconservation. Par ailleurs, pour une utilisation industrielle, la production de polyproline serait plus simple que la réplication des protéines antigels naturelles. ■

S. B.

B. Graham et al., *Ang. Chem. Int. Ed.*, vol. 56, en ligne le 22 novembre 2017

ASTROPHYSIQUE

## POURQUOI L'OcéAN D'ENCELADE NE GÈLE PAS



L'eau qui s'infiltre dans le noyau d'Encelade serait chauffée par les forces de marée dues à Saturne et expulsée par des points chauds, notamment au pôle sud.

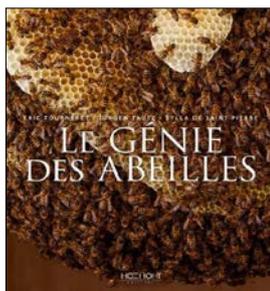
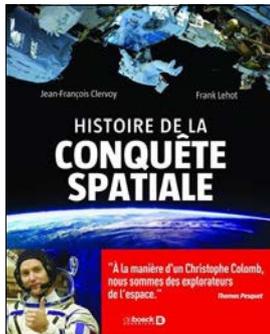
**E**n orbite autour de Saturne, Encelade est un corps de 500 kilomètres de diamètre couvert d'une croûte de glace qui cache un océan d'eau liquide. Mais quelle source de chaleur empêche cet océan de geler? De nombreuses hypothèses ont été avancées, mais aucune n'était complètement satisfaisante. Avec une équipe internationale, Gaël Choblet et Gabriel Tobie, chercheurs du CNRS à l'université de Nantes, proposent un nouveau mécanisme qui rend compte de toutes les observations d'Encelade réalisées par la sonde *Cassini*.

Selon ce scénario, le noyau rocheux de la lune, dont les pores sont remplis d'eau, est facilement déformable. Comme il est soumis aux intenses forces de marée de Saturne, les grains rocheux frottent les uns contre les autres et chauffent ainsi l'eau qui les entoure. Les simulations réalisées par Gaël Choblet et ses collègues montrent que l'eau atteint une température de 90 °C et remonte à la surface du noyau où elle forme des points chauds. Elle se diffuse alors dans l'océan et contribue à chauffer celui-ci. Au total, la puissance générée par les forces de marée serait comprise entre 10 et 30 gigawatts, assez pour que l'océan reste liquide plusieurs centaines de millions d'années, compte tenu des pertes de chaleur vers l'espace.

En outre, l'eau serait expulsée principalement dans la direction des pôles, le chauffage de marée dans le noyau étant deux fois plus fort aux pôles qu'à l'équateur. Si la croûte de glace est initialement plus mince au pôle sud, la modélisation montre qu'elle fondrait davantage dans cette région. Cette asymétrie expliquerait pourquoi la sonde *Cassini* n'a observé des geysers qu'au pôle sud. Pour valider ce scénario, les futures missions de sondes spatiales munies de radars, dont les ondes peuvent pénétrer sous la glace et ainsi mieux explorer la structure interne d'Encelade et son activité hydrothermale, seront cruciales. ■

S. B.

G. Choblet et al., *Nature Astronomy*, vol. 1, pp. 841-847, 2017



**ARCHÉOLOGIE**

**VERCINGÉTORIX  
CHEF DE GUERRE**

Alain Deyber

Lemme, 2017

224 pages, 22 euros

Ancien officier, archéologue et historien militaire, Alain Deyber avait déjà publié il y a quelques années un remarquable essai d'histoire militaire consacré à la période préromaine: *Les Gaulois en guerre. Stratégies, tactiques et techniques*. Il nous livre aujourd'hui une monographie sur Vercingétorix en tant que chef de guerre. Au milieu du 1<sup>er</sup> siècle avant notre ère, la Gaule – ou du moins ses cités les plus importantes (Éduens, Arvernes, Bituriges...) – évolue vers une organisation sociale étatique dont une composante forte est la construction d'une armée de métier. Le rôle de Vercingétorix sera de fédérer ces cités et de convertir les groupes de valeureux guerriers gaulois en militaires. Souvent travesties dans l'écriture du roman national, les qualités de stratège de Vercingétorix sont ici bien mises en avant. Si, comme le souligne Alain Deyber, la carrière du chef arverne se ramène en définitive à un court affrontement contre César, force est de constater que Vercingétorix fut le véritable adversaire du proconsul au point qu'il faillit les détruire, lui et son armée. Deux stratégies s'affrontent durant la Guerre des Gaules: celle de l'attaque à outrance menée par César et celle dite de l'abcès de fixation menée par le Gaulois. L'ouvrage montre clairement que Vercingétorix bénéficiait d'une bonne formation militaire et de toutes les qualités d'un chef militaire mais que ses troupes étaient inégales et que, surtout, elles avaient du mal à se représenter l'ennemi et les enjeux politiques du conflit. On voit la spécificité de ce livre qui, au-delà des militaria et des traces archéologiques de la Guerre des Gaules, dresse une analyse anthropologique des troupes et de leurs chefs, Vercingétorix en premier lieu. Ce texte, ses tableaux chronologiques commentés et son important glossaire militaire constitueront pour l'étudiant et l'érudit un outil original et utile.

DOMINIQUE GARCIA / INRAP

**BOTANIQUE**

**LES ARBRES AMOUREUX**

Francis Hallé, Stéphane Hette et Frédéric Hendoux

Salamandre, 2017

144 pages, 39 euros

Eh oui, avant les noisettes, les glands, les merises, il y a des fleurs! Ce beau livre est une douceur. On peut simplement le feuilleter pour s'évader dans l'univers extraordinaire des fleurs de vingt espèces, ou s'attarder sur les très belles photographies sur fond blanc de chatons mâles et femelles, fleurs d'apparat, fruits, souvent en gros plan, ou encore passer un peu plus de temps avec la lecture des courtes monographies qui accompagnent ces belles illustrations.

L'appareil reproducteur des arbres est plutôt discret sous nos latitudes, mais le photographe nous montre des formes extraordinaires et des couleurs flamboyantes, telle la couleur rouge carmin des stigmates de l'inflorescence femelle du noisetier. Avec cet ouvrage, on arriverait presque aussi à humer des parfums! C'est au moins le cas quand vient le tour du chèvrefeuille des bois, qui accompagne parfois les arbres de nos forêts.

Certaines fleurs font appel au vent pour déposer, sur le pistil d'une autre fleur, le pollen qu'elles produisent; d'autres sont conçues pour séduire des insectes butineurs qu'elles gratifient et fidélisent en leur offrant un délicieux nectar. Et parfois, les arbres comptent sur les oiseaux pour disperser leurs graines. Les images sont belles et les textes qui expliquent les stratégies de reproduction des arbres sont instructifs, agréables à lire grâce à un rythme dynamique. Résultat de la collaboration de deux botanistes et d'un photographe hors pair, ce livre est à s'offrir ou à offrir sans modération: c'est un merveilleux bouquet de fleurs...

RÉGINE TOUFFAIT / ONF

## HISTOIRE DE LA CONQUÊTE SPATIALE

Jean-François Clervoy  
et Franck Lehot

De Boeck, 2017

224 pages, 25 euros

Ce livre nous éclaire avec des mots simples sur ce qui est, et restera, l'une des plus grandes ambitions et aventures humaines : l'exploration spatiale. Le format de l'ouvrage met en avant la chronologie complète et détaillée de cette exploration, en accompagnant chaque date clé d'un texte court et de nombreuses photographies.

Les diverses anecdotes et les témoignages qui ponctuent la chronologie humanisent cette aventure en donnant au lecteur un aperçu du quotidien et de l'intimité des astronautes (leur sommeil, leur toilette...). On y apprend par exemple que, lors de leur premier séjour dans l'espace, ils subissent un bizutage, ou encore qu'il est interdit de jouer sur la Lune!

Le livre montre aussi la filiation de la mission de Thomas Pesquet. Au regard des précédentes et nombreuses missions, le retentissement mondial de son séjour dans la station spatiale internationale (ISS) permet de mesurer le bond extraordinaire dans la communication, notamment *via* les réseaux sociaux. Nul doute que l'impact de cette mission sera important à bien des égards : en plus de redonner déjà une visibilité plus grande à la participation européenne à l'aventure spatiale, elle touche aussi le grand public d'une manière inédite en permettant à tout un chacun de visiter l'ISS *via* Google Street View.

Il y a fort à parier que l'exploration spatiale continuera d'être une source d'enjeux géopolitiques et économiques, mais aussi une source d'inspiration, notamment pour les jeunes.

Accessible à tous, cet ouvrage est agréable à lire ou à parcourir au gré des dates clés. Subtilement, à travers les yeux des astronautes, il montre à quel point notre planète est belle et fragile. Cette préoccupation est certainement la raison pour laquelle les droits du livre sont reversés à l'association polynésienne de protection de l'océan *Te mana o te moana*.

NABILA AGHANIM / IAS

## LE GÉNIE DES ABEILLES

Éric Tourneret,  
Sylla de Saint-Pierre et Jürgen Tautz

Hozhoni, 2017

253 pages, 45 euros

Encore un livre sur les abeilles, direz-vous. Certes, ces photographies d'*Apis mellifera* sont fantastiques, très belles et aussi « pédagogiques », mais cela s'est déjà vu. Non, ce qui fait de ce livre un ouvrage incontournable pour tous ceux que les abeilles et les mécanismes de l'évolution intéressent est le texte extrêmement bien documenté, qui livre une foule d'informations de pointe sur le sujet. On peut d'ailleurs conseiller au lecteur de faire une première lecture, puis d'y revenir pour en extraire les dernières gouttes de nectar scientifique.

L'ouvrage donne une vision exhaustive du superorganisme qu'est la ruche et des insectes qui le constituent. Il explique clairement le fonctionnement d'une société de milliers d'individus aux ressources cérébrales limitées, sans chefs ni cerveau central – un modèle de société aux performances remarquables, mais immuable et non transférable à une espèce non eusociale telle qu'*Homo sapiens*.

Les menaces d'extinction des abeilles et des insectes pollinisateurs sous l'action rapace et stupide d'*H. sapiens* sont largement évoquées avec les enjeux pour la survie des écosystèmes et d'*H. sapiens*. La colonisation planétaire par les Occidentaux a amené *A. mellifera* à devenir nuisible, invasive et destructrice d'autres abeilles de nombreuses régions. Les Amérindiens l'appelaient la « mouche des Blancs », qu'elle devançait de quelques années. Une autre *Apis* avait d'ailleurs colonisé l'Amérique au Miocène puis disparu avant qu'*H. sapiens* n'y arrive.

Malgré quelques petites imprécisions et l'absence d'un index, un grand livre, dans tous les sens du terme.

ANDRÉ NEL / MNHN



### L'INVENTION DE LA NATURE

Andrea Wulf

Noir sur Blanc, 2017

624 pages, 28 euros

Qui est le plus grand savant du XIX<sup>e</sup> siècle ? Laplace, Lamarck, Darwin, Hilbert... ? Inutile polémique, mais cet excellent ouvrage, facile et agréable à lire, montre en tout cas une chose : celui qui embrassa le plus est Alexander von Humboldt. Ce fils de Hobereau prussien est aussi un fils de France. Ce francophile vint en effet se nourrir aux Lumières françaises avant de se lancer, avec un compagnon français, dans un voyage qui apporta beaucoup aux sciences, mais surtout lui fit fonder l'écologie et prédire, déjà, des changements climatiques d'origine anthropique... Un visionnaire, dont il est passionnant de connaître l'œuvre.

### LES MATHÉMATIENS SE PLIENT AU JEU

Jean-Paul Delahaye

Belin, 2017

184 pages, 24 euros

Actualisés et classés par thèmes, ce recueil rassemble vingt articles parus dans la rubrique « Logique & calcul » de *Pour la Science*. L'auteur joue à ses lecteurs des tours dignes de ceux d'un prestidigitateur devant ses spectateurs. Là où l'intuition est certaine que ceci ou cela est impossible, il montre et démontre que si, c'est possible. Et de situations banales (battre un jeu de cartes, par exemple, ou jouer à pile ou face), il tire plus de lapins que jamais magicien n'en tira de son chapeau !

### LE GÉNIE DES OISEAUX

Jennifer Ackerman

Marabout, 2017

416 pages, 19,90 euros

Une remarquable journaliste scientifique américaine discute ici de tout ce qui fait l'intelligence de ces créatures ailées. Un caractère qui, nous fait-elle vite comprendre, tient autant aux performances spectaculaires de leurs corps qu'à celles de leurs cerveaux dont le poids se mesure pourtant en grammes. Pensée, technique, chants, langages, aptitudes esthétiques, sens de l'orientation, adaptation... Cette belle plume passe en revue quantité de traits fascinants chez ces espèces. Un récit vivant et empreint d'amour.

RENNES

JUSQU'AU 1<sup>ER</sup> AVRIL 2018

Musée de Bretagne – Les Champs Libres  
www.musee-bretagne.fr

# J'y crois, j'y crois pas



Encore au XXI<sup>e</sup> siècle, l'irrationnel occupe une place importante dans toutes les sociétés, y compris en Occident. Parmi les multiples formes qu'il revêt figurent la magie et la sorcellerie, et c'est là-dessus que porte cette exposition. Celle-ci offre un tour d'horizon et des clés de lecture de cet univers occulte où le bien et le mal sont considérés comme la manifestation de forces invisibles – des forces que peuvent décrypter ou manipuler cartomanciens, voyants, sorciers, guérisseurs et autres désenvoûteurs. À travers des objets, des pho-

tographies, des documents audiovisuels, le visiteur est familiarisé avec les diverses facettes de ce monde ainsi qu'avec l'imagerie et les stéréotypes que véhiculent les œuvres de fiction, littéraires ou cinématographiques.

L'exposition invite à se questionner sur des pratiques et des croyances toujours présentes, notamment en Bretagne. Elle évite tout jugement de valeur : il ne s'agit pas d'opposer le monde occulte à la rationalité, mais d'offrir un regard ethnologique, dans la lignée des recherches de Jeanne Favret-Saada. ■

PARIS

JUSQU'AU 26 MARS 2018

Cité de l'architecture et du patrimoine  
www.citedelarchitecture.fr

## Globes



Les architectes ont accompagné les astronomes, les géographes et les écrivains dans la représentation du monde terrestre et du cosmos. Des documents, maquettes, dessins, plans et films relatifs à 90 projets architecturaux, fondés sur une géométrie sphérique, réalisés ou non et remontant jusqu'au XVI<sup>e</sup> siècle, illustrent cette relation intime entre architecture, science et science-fiction. ■

MONTPELLIER

JUSQU'AU 31 JANVIER 2018

Bibliothèque interuniversitaire de Montpellier  
www.umontpellier.fr/agenda

## L'arbre des savoirs



Prolongeant un colloque tenu à l'occasion de l'édition numérique commentée de l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert, cette exposition évoque, à travers des documents, des objets scientifiques et des dessins artistiques, l'encyclopédisme et la répartition du savoir en ses diverses branches (philosophie, art, chimie, botanique, etc.) à l'époque de d'Alembert. ■

CONFÉRENCES

9 et 11 janvier 2018, 18 h  
Chambéry puis Annecy  
www.univ-smb.fr/amphis  
Tél. 04 79 75 91 20

PAVAGES

Le mathématicien Pierre Hyvernat fait découvrir les symétries parfois cachées que recèlent les constructions de la nature ou les pavages.

10 janvier 2018, 19 h 30

Villefontaine (Isère)  
www.frapna-38.org  
Tél. 04 74 95 71 21

LES GLIRIDÉS

Une conférence à la découverte de cette famille de rongeurs discrets à laquelle appartiennent les loirs, les muscardins ou les lérots.

17 janvier 2018, 18 h 30

BnF – Paris  
www.bnf.fr

CLASSER LES FORMES

Le mathématicien Nicolas Bergeron lira un texte d'Henri Poincaré sur la formule d'Euler – qui relie les nombres de sommets, d'arêtes et de faces d'un polyèdre. Avec l'aide de films réalisés par Jos Leys.

20 janvier 2018, 14 h

Domaine de Montauger (Essonne)

www.essonne.fr  
Tél. 01 60 91 97 34

HISTOIRE DE REQUINS

Une conférence sur l'évolution de ces animaux qui ne sont pas des poissons et dont les plus anciens sont apparus il y a plus de 400 millions d'années.

23 janvier 2018, 17 h

Académie des sciences, Paris

www.academie-sciences.fr

MÉDECINE DE PRÉCISION DES CANCERS

Daniel Louvard, directeur du centre de recherche de l'institut Curie, présentera les nouveaux traitements des cancers : thérapies ciblées, immunothérapie, cellules souches.

25 janvier 2018

France et étranger  
lanuitdesidees.com/fr/  
LA NUIT DES IDÉES

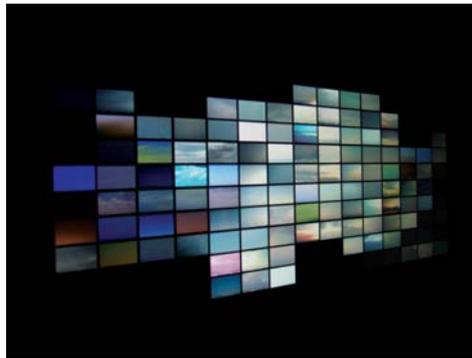
Troisième édition de cette manifestation où sont proposées de nombreuses conférences.

**JUSQU'AU 18 MARS 2018**  
**Fondation Groupe EDF**  
[fondation.edf.com](http://fondation.edf.com)

# La belle vie numérique!

Cette exposition ne porte pas sur l'art numérique. Elle a plutôt l'ambition de capter le regard porté par les artistes sur la transformation de notre vie par l'irruption des technologies numériques et d'inviter à une réflexion sur les pratiques artistiques d'aujourd'hui. Elle propose un parcours assez éclectique à travers des œuvres d'une trentaine d'artistes, dont certains sont déjà reconnus, comme Aram Bartholl, Lee Lee Nam, Carla Gannis...

L'une des thématiques mises en avant a trait au quotidien, avec par exemple une vidéo de type bande dessinée de l'artiste Winshluss (alias Vincent Paronnaud), qui commente avec dérision et humour noir la dépendance aux smartphones. Une autre est la question de savoir si les nouveaux outils technologiques de création révolutionnent les codes esthétiques, notamment avec des œuvres où se mêlent



images, sons, données, comme l'illustre notamment *Tempo II* de Marie-Julie Bourgeois, qui fait intervenir programmation et composition sonore (photographie ci-dessus).

La démocratisation de la pratique artistique fait aussi partie des thèmes abordés. Car aujourd'hui, la facilité avec laquelle chacun peut produire des images et les diffuser engendre une profusion d'œuvres dont certaines ont une qualité artistique, mais dont les auteurs n'ont pas forcément un statut ou une conscience d'artiste... Un thème où s'inscrit par exemple *Le Jardin des délices émojis* de l'artiste new-yorkaise Carla Gannis, triptyque imitant celui de Jérôme Bosch, avec des visages représentés par des émoticônes... ■

**10 janvier 2018, 8 h 30**  
**Porte des Alpes (Isère)**  
[www.frapna-38.org](http://www.frapna-38.org)  
 Tél. 04 76 90 31 06

## ÉTANG DE SAINT-BONNET

Une excursion à la découverte des oiseaux de cette réserve naturelle de 51 hectares.

**13 et 14 janvier 2018**  
**Essonne**

[www.essonne.fr](http://www.essonne.fr)  
 Tél. 01 60 91 97 34

## COMPTAGE D'OISEAUX

Une matinée pour compter les oiseaux d'eau, opération qui fournit des informations utiles à la préservation de l'avifaune et des zones humides.

**27 janvier 2018**  
**Ormay-la-Rivière (91)**

[www.essonne.fr](http://www.essonne.fr)  
 Tél. 01 60 91 96 96

## CRAPAUDROME

Chantier nature, à la journée, pour mettre en place un dispositif permettant aux crapauds de rejoindre leurs mares en toute sécurité.

**cité**

sciences  
et industrie

# LES CONFÉRENCES

## Quand la science bouleverse l'art

Trois artistes composent de nouvelles visions du monde en s'imprégnant des évolutions et révolutions scientifiques récentes.

**mardi 16 janvier à 19h**

**Plasticité : le cerveau créateur**

Sylvie Captain-Sass, neuro-plasticienne, chercheuse.

**mardi 23 janvier à 19h**

**Mimarium : une biologie vidéo plastique**

Catherine Nyeki, artiste plasticienne plurimedias, musicienne.

**mardi 30 janvier à 19h**

**Paléo-art : la biodiversité du futur**

Marc Boulay, paléo-artiste, sculpteur animalier, et Jean-Sébastien Steyer, paléontologue au CNRS/ MNHN.

**programme complet sur [cite.sciences.fr](http://cite.sciences.fr)**

Entrée gratuite dans la limite des places disponibles

NOUVELLE SCIENCE

culture plus



LA CHRONIQUE DE  
**GILLES DOWEK**

# INTERNAUTE, QUEL EST TON NOM ?

Sur Internet, les différents services nous reconnaissent grâce à un identifiant : un numéro de téléphone, une adresse électronique... De nouvelles formes d'état civil... sans État !



Dans le village global d'Internet, il n'y a pas de système pour identifier de façon unique une personne.

**P**our utiliser un service en ligne – une messagerie, un réseau social, une boutique... – nous avons besoin d'un « identifiant », qui nous distingue parmi les usagers de ce service. Souvent, nous choisissons nous-mêmes cet identifiant, parmi ceux qui ne sont pas encore utilisés.

Mais nous ne pouvons pas choisir avec la même liberté, par exemple, une adresse électronique car il n'y a pas de base de données centrale des adresses déjà utilisées. Les fournisseurs de service de courrier électronique utilisent donc une technique plus complexe, qui articule adroitement centralisation et décentralisation : chaque pays choisit d'abord un identifiant, par exemple « fr » pour la France, sous le contrôle d'une autorité mondiale qui veille à l'absence de doublon ; dans chaque pays, chaque fournisseur choisit ensuite un identifiant – « pourlascience », « orange », etc. – sous le contrôle d'une autorité nationale ; enfin, chaque utilisateur choisit son identifiant sous le contrôle du fournisseur d'accès.

Chaque utilisateur est ainsi distingué par le triplet utilisateur@fournisseur.pays. La technique n'est pas nouvelle : les numéros de téléphone sont, depuis toujours, attribués à l'aide d'une méthode similaire.

Même si nous souhaitons parfois utiliser différents identifiants sur différents services, certains services, comme certaines messageries, nous demandent de

**Nous choisissons souvent nous-mêmes ces « noms » et nous pouvons en avoir plusieurs**

réutiliser un identifiant, tel notre numéro de téléphone, que nous utilisons déjà ailleurs. Ces identifiants dépassent alors le cadre d'un service particulier, ils deviennent de véritables noms.

Ces techniques d'attribution d'identifiants appartiennent donc à la langue tra-

dition des techniques d'anthroponymie, qui permettent à des groupes de personnes de désigner chacun de leurs membres par un nom différent. Au Moyen Âge, par exemple, on attribuait, dans chaque village, un nom – Jeanne, Arthur, etc. – à chaque personne à sa naissance, et peu importait qu'il existât un autre Arthur dans le village voisin, avec lequel on avait peu de contacts. Mais la taille des groupes augmentant, il devint nécessaire, pour éviter les homonymies, d'ajouter à ce nom un surnom qui, à la fin du Moyen Âge, devint héréditaire : un « nom de famille ».

Cette technique, qui n'est que l'une des nombreuses utilisées de par le monde, ne garantit cependant pas l'absence d'homonymie : des cousins éloignés, qui portent le même nom, peuvent recevoir le même prénom à la naissance. On a ainsi inventé d'autres techniques, moins sujettes à l'homonymie, par exemple le numéro d'inscription au répertoire de l'Insee. En théorie, des mots de sept lettres suffiraient à distinguer tous les humains.

Mais, dans le village global, aucune de ces techniques ne fonctionne : les couples prénom-nom sont trop peu nombreux, les numéros Insee sont propres à la France, accoler au prénom et au nom la date et le lieu de naissance produit un identifiant trop long, affecter à chaque nouveau-né un nom de sept lettres exige une autorité centrale, etc. Les adresses électroniques et les numéros de téléphone sont donc les seuls identifiants qui garantissent l'absence d'homonymie. De ce fait, ils tendent à devenir peu à peu notre état civil.

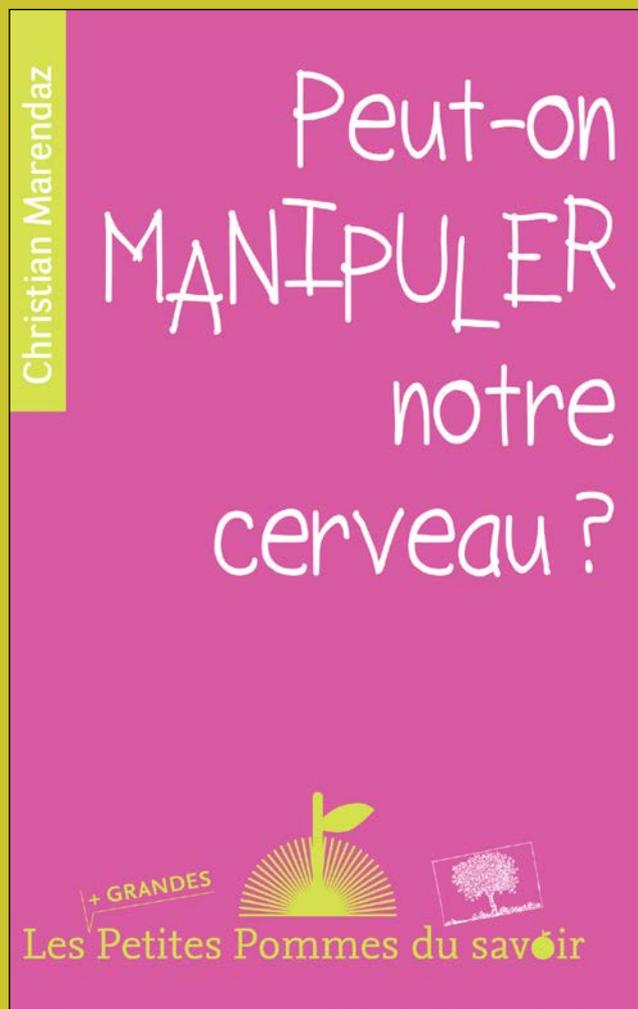
Ces « noms » présentent plusieurs nouveautés : nous les choisissons souvent nous-mêmes, nous pouvons en avoir plusieurs, nous pouvons en changer plusieurs fois au cours de notre vie, ils ne nous survivent pas et l'État ne joue qu'un rôle mineur dans leur attribution. Ainsi, les administrations, insuffisamment informatisées et internationalisées, semblent avoir abandonné à d'autres le soin de nous nommer. ■

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

Livre  
conseillé par  
POUR LA  
**SCIENCE**

# Fantasma ou réalité ?

Entre espoirs  
fondés  
et dérives  
probables,  
le point sur  
la question  
en 128 pages.



128 p. - 7,90 €

Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site  
[www.editions-lepommier.fr](http://www.editions-lepommier.fr)





LA CHRONIQUE DE  
GÉRALD BRONNER

# WEINSTEIN ET LA VISCOSITÉ SOCIALE

Avec les réseaux sociaux d'Internet, l'information circule plus facilement. Cette réduction de la « viscosité » favorise la survenue d'effets papillon sociaux.



Par analogie avec la résistance à l'écoulement d'un fluide visqueux, on peut assimiler à une viscosité sociale la difficulté avec laquelle l'information circule au sein de la société.

**L**e philosophe Pascal, avant même Henri Poincaré, fut sans doute l'un des premiers à imaginer l'existence de phénomènes relevant de l'hyper-sensibilité aux conditions initiales, c'est-à-dire l'imprévisibilité d'un système déterministe soumis à des modifications même infimes. Dans ses célèbres *Pensées*, il soulignait: «Le moindre mouvement importe à toute la nature, la mer entière change pour une pierre.» Cette idée lui permettait aussi de mettre en exergue la vanité des hommes, dont le monde pouvait être massivement perturbé par un détail. Une vanité que rappelle l'une de ses remarques les plus célèbres: «Le nez de Cléopâtre, s'il e t été plus court, toute la face de la terre aurait changé.»

Cela décrit d'une certaine façon ce qui sera popularisé plus tard sous le terme d'effet papillon par le météorologue américain Edward Lorenz, dont une conférence donnée en 1972 s'intitulait: «Le battement d'ailes d'un papillon au Brésil peut-il provoquer une tornade au Texas?»

De ce point de vue, l'une des affaires les plus marquantes de la rentrée, le

«scandale Weinstein», du nom de ce producteur de cinéma américain tout-puissant accusé d'agression sexuelle par plus de 90 femmes, n'est pas sans intérêt.

On découvre que, sur la foi de plusieurs témoignages, les appétits du producteur et sa façon de les manifester étaient, dans le milieu, un secret de polichinelle. Pour mille et une raisons, ces témoignages et ces plaintes se sont peu diffusés avant que

**Sur le réseau Facebook, il n'y a que 3,57 degrés de séparation entre deux individus pris au hasard**

l'affaire n'éclate au grand jour. Pour ainsi dire, la viscosité du milieu social, c'est-à-dire sa résistance à l'écoulement de l'information, était élevée à ce stade.

En octobre, le dévoilement de l'affaire par plusieurs articles de presse a produit une augmentation vertigineuse de la

fluidité de l'information sur ce scandale, qui a fait le tour du monde.

L'un des points intéressants est l'effet de domino produit. Sur les réseaux sociaux, les mots-dièse #MeToo ou #balancetonporc ont entraîné une cascade de polémiques collatérales, par exemple celle concernant l'islamologue suisse Tariq Ramadan, accusé par plusieurs personnes de viol, polémique qui a inspiré une caricature de *Charlie Hebdo* ayant elle-même entraîné une violente polémique avec *Mediapart*...

Le thème de l' hypersensibilité aux conditions initiales et de l'effet papillon est, une fois de plus, assez bien illustré par un phénomène social. On peut ajouter que la viscosité du milieu social paraît décroître par le truchement des réseaux sociaux. L'une des mesures tangibles de cette fluidification est révélée par la célèbre estimation des degrés de séparation réalisée par Stanley Milgram à la fin des années 1960.

Ce psychologue américain avait réalisé une expérience consistant à demander à 296 personnes de faire parvenir une lettre à un habitant d'une autre ville, qu'ils ne connaissaient pas. Il s'agissait de choisir des destinataires susceptibles de connaître cette personne, ou de connaître un autre intermédiaire. Les résultats de cette astucieuse expérimentation ont montré qu'en moyenne, une chaîne de 5 ou 6 personnes était nécessaire pour réaliser la tâche. De là est venue l'idée qu'entre nous et un autre individu que nous ne connaissons pas, il y a au plus 6 degrés de séparation.

Or Facebook a calculé en 2016 que sur son réseau social d'internautes, il n'y a en moyenne que 3,57 degrés de séparation entre deux individus pris au hasard. Autrement dit, en densifiant les ressources des réseaux sociaux, Internet facilite la mise en contact des personnes que l'espace géographique sépare. Même s'il est difficile de le mesurer, on peut raisonnablement conjecturer que cette fluidité a accru l'empire des effets papillon sur le monde social et que les tornades ne sont pas près de cesser de déferler. ■

**GÉRALD BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.**

# Dans l'**inter**êt de la science

mathieu  
vidard

la tête au carré  
14:05-15:00



france  
**inter**venez  
franceinter.fr

L'ESSENTIEL

> L'imagerie cérébrale ne suffit pas toujours pour établir si un patient atteint de graves troubles cérébraux est conscient de son environnement.

> Ces dernières années, le développement d'une sorte de « conscienciomètre » a ouvert la possibilité de déterminer de façon

fiable si une personne est consciente, qu'elle soit juste profondément endormie, sous anesthésie ou dans le coma.

> De tels outils pourraient aider les médecins et les familles de dizaines de milliers de patients incapables de communiquer à décider des soins à leur prodiguer.

L'AUTEUR



CHRISTOF KOCH  
chercheur et président de l'institut Allen de science du cerveau, à Seattle, aux États-Unis

# Mesurer la conscience est enfin possible

COMMENT SAVOIR SI UNE PERSONNE EST CONSCIENTE OU NON QUAND ELLE NE PEUT PAS COMMUNIQUER AVEC AUTRUI ? UNE MÉTHODE CONSISTANT À ANALYSER L'ACTIVITÉ ÉLECTRIQUE DU CERVEAU JUSTE APRÈS UNE STIMULATION MAGNÉTIQUE A FAIT SES PREUVES.

**J**e suis mort à maintes reprises. Chaque soir lorsque, rompu de fatigue, je m'assoupis, ma conscience s'éteint. Je ne ressens plus rien jusqu'à ce que je me réveille à l'intérieur de mon corps endormi – dans un rêve déconnecté du monde extérieur. Ou jusqu'au matin suivant quand, de retour dans le monde réel, ma conscience émerge à nouveau.

La vie quotidienne est pleine d'expériences similaires. Enfant, j'ai subi une appendicectomie sous anesthésie: ma conscience a été interrompue, puis restaurée après l'opération. Dans un vague souvenir remontant à l'adolescence, je me revois sur le siège arrière d'une Renault qui descend une avenue bordée d'arbres, en Afrique du Nord. Soudain, le décor change. Je suis toujours dans cette même rue, mais j'observe la scène depuis le sol. La voiture avait heurté un arbre, ce qui m'a éjecté sur le pavé, et je m'étais évanoui.

Nombre d'entre vous ont connu des pertes de conscience similaires. Nous sommes tous habitués au cycle circadien d'éveil, de sommeil

et de rêve. Mais pour certains patients atteints d'un traumatisme crânien, l'expérience est tout autre: la conscience s'enfuit pendant des jours, des semaines, voire des années.

En pratique, un médecin peut avoir des difficultés à déterminer si quelqu'un est profondément endormi, sous anesthésie ou souffrant d'une grave lésion au cerveau. Une personne allongée les yeux ouverts ressent-elle quelque chose, quelle qu'en soit la nature, ou sa conscience a-t-elle pris le large ?

Idéalement, il faudrait un outil de mesure de la conscience pour répondre à ces questions. À première vue, l'idée d'un équivalent, pour la conscience, du tensiomètre peut sembler absurde. Mais le développement de plusieurs techniques ces dernières années a ouvert de réelles perspectives d'obtenir des détecteurs répondant aux critères recherchés: des appareils utilisables en médecine et en recherche pour déterminer si une personne ressent quelque chose. Un tel outil aiderait aussi les médecins et les familles concernées à décider de la prise en charge de dizaines de milliers de patients incapables de communiquer.



> Envisager le développement d'un outil de mesure de la conscience requiert de s'intéresser aux dynamiques internes de notre vie mentale. Cette activité fluctue en quelques fractions de seconde, ce qui impose de mesurer les signaux cérébraux sur une échelle de temps similaire. L'outil physiologique le plus important pour évaluer la conscience à partir de l'exploration du cerveau a été, et continue d'être, l'électroencéphalographie, ou EEG.

C'est un psychiatre allemand qui, dans l'entre-deux-guerres, a développé cette technique. Hans Berger a consacré sa vie à rechercher le lien entre l'expérience subjective et l'activité du cerveau. En 1924, il enregistra pour la première fois les ondes cérébrales d'un patient – des travaux qu'il publia en 1929. L'EEG est ensuite peu à peu devenue l'outil fondamental de tout un domaine médical, la neurophysiologie clinique.

Bien sûr, l'EEG n'est pas le seul moyen d'enregistrer l'activité cérébrale. Les outils les plus répandus mesurent les dynamiques du flux sanguin à l'intérieur du cerveau à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) ou détectent, par magnétoencéphalographie, le champ magnétique induit par l'activité électrique des neurones. Mais ces instruments, de même que des techniques plus récentes comme la spectroscopie dans l'infrarouge proche, ne sont pas encore exploitables en routine à l'hôpital à cause de diverses difficultés méthodologiques et pratiques.

## ENREGISTRER LES ONDES CÉRÉBRALES

L'EEG mesure les minuscules fluctuations de potentiel électrique (de 10 à 100 microvolts) qu'engendre l'activité électrique à travers le néocortex, la surface externe du cerveau responsable de la perception, de l'action, de la mémoire et de la pensée. Les principaux contributeurs de l'activité électrique collective qui, pense-t-on, produit les signaux enregistrés sont les neurones pyramidaux du cortex, nommés ainsi à cause de leur forme tétraédrique. On déduit indirectement la contribution de structures plus profondes, telles que le thalamus, à travers leur action sur les cellules corticales.

La technique, non invasive, fonctionne au moyen d'électrodes placées sur le cuir chevelu. Avec l'apparition des systèmes d'EEG à haute densité (comportant jusqu'à 256 électrodes), les cartes montrant la distribution de l'activité électrique dans le cerveau sont devenues courantes. Certes, placer les électrodes enduites d'un gel humide et conducteur sur la peau nettoyée du crâne est contraignant, chronophage et propice aux erreurs si les électrodes bougent, ce qui limite l'utilisation de cette technique. Mais grâce aux nouvelles électrodes, sèches et plus sensibles, l'EEG s'est répandue au-delà

des hôpitaux. Elle permet par exemple à des athlètes de surveiller leur activité cérébrale pendant plusieurs heures et ainsi de s'entraîner à se concentrer, ou à des personnes insomniaques de mieux connaître leur sommeil naturel afin de le prolonger.

Depuis la fin des années 1940, un électroencéphalogramme «actif» était la preuve la plus sûre qu'un sujet est conscient. Cet état se caractérise par des oscillations de faible amplitude, rapides, fluctuantes et désynchronisées. En général, plus la fréquence d'oscillation du signal diminue, plus la probabilité est faible que le sujet soit conscient. Mais cette règle souffre de suffisamment d'exceptions pour qu'on ne l'utilise pas comme base de détection de la conscience. Par conséquent, des scientifiques et des médecins se sont mis en quête de techniques de mesure plus fiables. Ils ont ainsi mis au point un nouvel outil fondé sur une propriété fondamentale de toute expérience consciente.

Avant de s'y arrêter, il est important d'en savoir plus sur les patients dont les médecins ont besoin de détecter la conscience et sur les raisons de ce besoin. Les médecins distinguent deux classes de patients (nous ne parlons ici



# Les médecins ont besoin de détecter la conscience de deux classes de patients

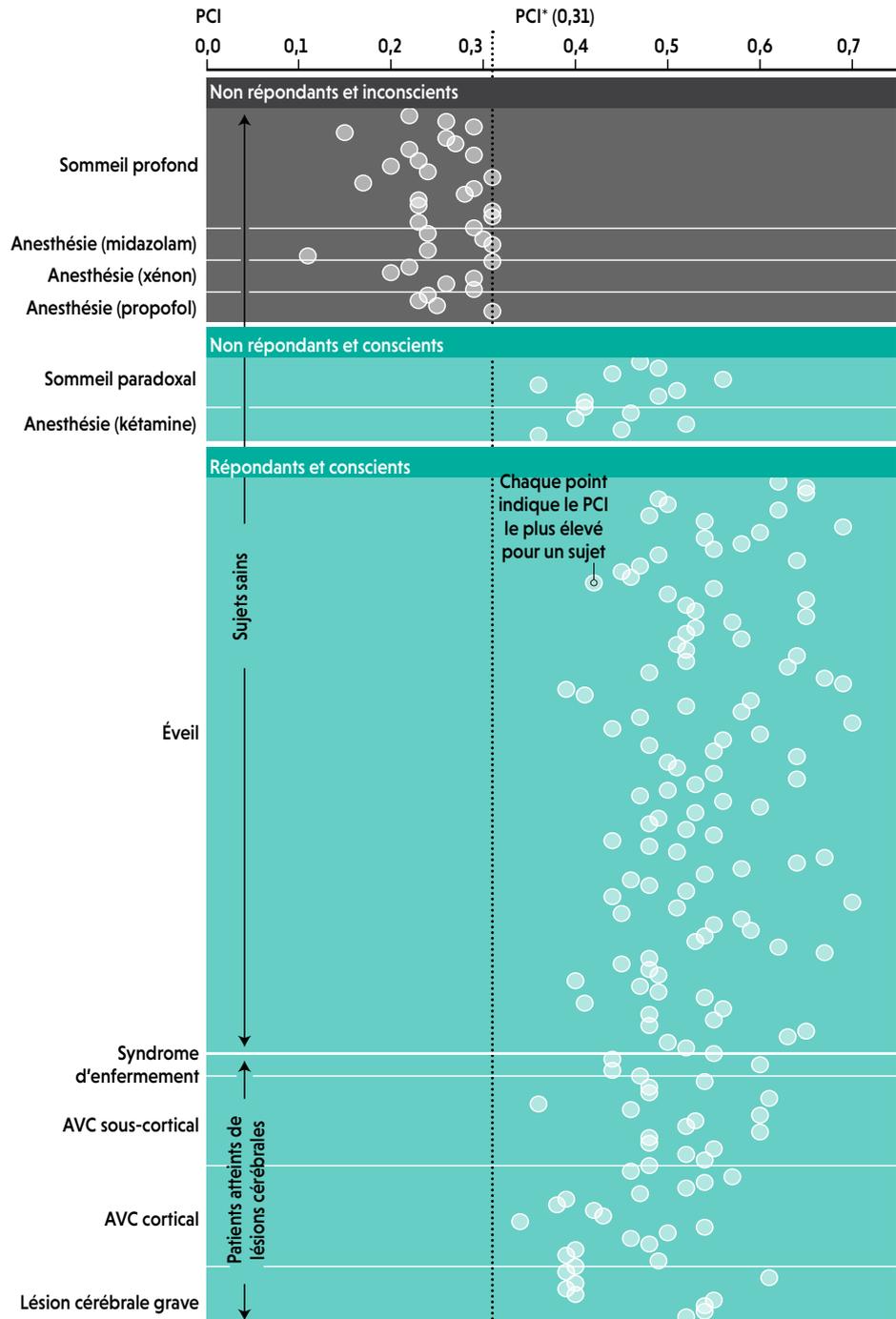


que d'adultes; les patients en pédiatrie représentent un tout autre défi qui ne sera pas développé ici). La première classe est constituée d'adultes souffrant de sérieux troubles de la conscience dus à un traumatisme crânien, à des infections du cerveau (encéphalite infectieuse) ou des membranes qui le protègent (méningite), à un accident vasculaire cérébral ou à des intoxications à la drogue ou à l'alcool. Après leur accident cérébral, les patients se stabilisent, mais demeurent infirmes et alités, incapables de parler ou d'exprimer leurs pensées et leurs intentions. Avec des soins adaptés pour éviter escarres et infections, ces patients vivent parfois pendant des années dans cet état.

Au sein de cette classe, les médecins distinguent plusieurs catégories. Les patients dans >

## LA TECHNIQUE DU ZAP AND ZIP

**S**ilvia Casarotto, de l'université de Milan, et ses collègues ont recruté 102 sujets sains et 48 atteints de lésions cérébrales, réveillés et répondants, pour les soumettre à leur test de détection de la conscience. À l'aide d'impulsions magnétiques, ils ont stimulé les cerveaux des participants (le zap) dans des états conscients et inconscients, puis mesuré leur réponse par électroencéphalographie. Ce résultat était ensuite analysé grâce à un algorithme de compression (le « zip »). Une valeur, nommée indice de complexité perturbacionnelle (PCI), a été calculée pour chaque mesure et les participants ont été interrogés sur leur état de conscience. Résultat : les sujets conscients avaient un PCI supérieur à 0,31 (PCI\*), et les sujets inconscients un score inférieur. Réalisé avec ce même seuil sur des patients dans le coma, ce test a révélé que certains étaient conscients (résultats non représentés).



> un état végétatif, mieux décrit par le terme moins péjoratif de « syndrome d'éveil non répondant », alternent des phases de sommeil et d'éveil. Pourtant, les tentatives de communication à leur chevet (« Si vous m'entendez, pressez ma main ou clignez des yeux ») échouent. Ces patients avalent, bâillent, ouvrent et bougent leurs yeux ainsi que leur tête, mais pas de manière intentionnelle. Leurs actions sont dépourvues de volonté et seuls persistent les réflexes cérébraux de base, c'est-à-dire l'activité contrôlant les processus fondamentaux tels que la respiration, les transitions éveil-sommeil, le rythme cardiaque, les mouvements des yeux et les réactions de la pupille à la lumière.

## Absence de preuve de conscience ne signifie pas preuve de l'absence de conscience

Beaucoup se souviennent de Terri Schiavo, une patiente de Floride qui, après un arrêt cardiaque, a vécu quinze ans en état d'éveil non répondant, jusqu'à ce que la justice américaine autorise son euthanasie en 2005. Les patients de cette catégorie représentent un phénomène moderne et doivent leur survie aux numéros d'urgence, aux hélicoptères et aux soins médicaux avancés d'aujourd'hui. Aux États-Unis, plus de 10 000 patients se trouvent dans cet état en vivant dans des établissements de soins palliatifs, des maisons de santé ou chez eux (en France, ils étaient environ 1 500 en 2002, selon le *Bulletin officiel*. En Belgique en 2010, on comptait par an 150 nouveaux cas pour un million d'habitants, un chiffre stable et similaire pour la France).

Il est tentant de considérer que ces patients n'éprouvent rien puisqu'ils sont incapables d'interagir avec leur environnement, mais l'absence de preuve ne signifie pas preuve de l'absence. Les patients en état d'éveil non répondant sont-ils capables de ressentir la douleur, le stress, l'anxiété, la solitude, la résignation, un flot de pensées... ou absolument rien? Difficile de répondre. Selon plusieurs études, 20% des patients en état d'éveil non répondant sont conscients et mal diagnostiqués. Pour la famille et les amis qui prennent soin du patient pendant >

« LA CONSCIENCE, 50 NUANCES DE GRIS ET PLUSIEURS DIMENSIONS »

### Comment vous êtes-vous lancé dans ces travaux ?

Quand j'ai commencé mes recherches, dans les années 1990, la conscience était un sujet tabou. Puis l'effort pour la comprendre est devenu international. Plusieurs hypothèses ont été proposées, dont une qui m'a particulièrement intéressé, de Giulio Tononi, médecin et mathématicien à l'université du Wisconsin à Madison: pour qu'un système soit conscient, il faut que l'information y soit engrangée de façon intégrée – l'information reçue ne peut pas être divisée en composantes discrètes et indépendantes. S'appuyant sur cette idée, Giulio Tononi a construit une théorie mathématique qui, certes, n'explique pas comment la matière devient pensée, mais a le mérite d'inviter la communauté scientifique à la mettre à l'épreuve.

C'est ainsi que Marcello Massimini, à l'université de Milan, a développé une technique qui mesure la connectivité dans le cerveau en couplant stimulation magnétique transcrânienne (le « zap ») et électroencéphalographie (*voir l'article*). Il a montré grâce à elle que la connectivité diminue quand on est endormi. J'ai eu très vite connaissance de cette technique et j'ai invité à Liège pour la tester chez des personnes dans le coma. On s'est alors aperçu que les réponses différaient beaucoup d'un patient à l'autre et qu'il existait un syndrome de déconnexion: le cerveau abîmé n'a plus la capacité d'intégrer l'information. De plus, les électroencéphalogrammes obtenus sont complexes – plus de 60 électrodes mesurent chacune un signal dans le temps. Nous avons donc



**STEVEN LAUREYS**  
directeur du Coma Science Group  
à l'université et au CHU de Liège,  
coauteur des études menées  
avec la technique « zap and zip »

Propos recueillis par MARIE-NEIGE CORDONNIER

cherché à réduire l'information qu'ils contenaient à un chiffre, l'indice PCI.

#### En quoi consiste cet indice ?

Pour l'élaborer, Adenauer Casali, dans le laboratoire de Marcello Massimini, a proposé d'effectuer une sorte de compression « zip » : à partir de l'électroencéphalogramme, il a construit une matrice traduisant le schéma d'activation spatio-temporelle du cerveau, c'est-à-dire résumant quelles zones s'activent et à quels moments. Le PCI mesure la complexité de cette matrice et donc de la connectivité cérébrale.

Quand une personne est dans le coma ou en éveil non répondant, soit la réponse est stéréotypée ou quasi absente, soit tout s'allume, signe qu'il n'y a pas d'intégration d'information. Ainsi, c'est bien la complexité de la réponse induite par les chocs de stimulation qui est captée lors

de la mesure. L'indice illustre le fait que pour être conscient, il faut que nos milliards de neurones soient bien connectés et que cette connectivité ne soit pas juste structurelle, mais aussi fonctionnelle.

#### Quel est l'intérêt d'une telle mesure ?

Le PCI vient compléter le diagnostic, car il évalue la capacité de conscience du patient indépendamment de sa capacité à traiter des stimuli extérieurs ou à bouger, puisqu'on stimule directement le cerveau. Que le patient comateux soit sourd, paralysé ou aphasique, le test va fonctionner, alors qu'un doute subsiste lorsque le patient ne répond pas à un test neurologique classique comme lui demander de bouger la main.

De plus, le PCI se révèle en accord avec les autres tests techniques actuellement disponibles : dans notre groupe, Olivier Bodart a récemment montré qu'il est corrélé avec l'activité métabolique du cerveau, mesurée en tomographie par émission de positrons. Il semble aussi qu'il soit corrélé avec le degré de connectivité structurelle mesuré avec l'imagerie par résonance magnétique. En associant ces techniques ainsi que l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle – une autre approche du fonctionnement du cerveau –, on espère affiner le diagnostic et le pronostic. Si ces examens suggèrent que le patient a une forme de conscience, cela signifie qu'il peut percevoir la douleur et on lui administrera des antidouleurs. Son pronostic étant meilleur, on intensifiera aussi la rééducation.

Par ailleurs, ces tests peuvent guider les interventions thérapeutiques : nous travaillons notamment sur la stimulation cérébrale non invasive, une stimulation

électrique à courant continu qui améliore l'état de conscience de certains patients. Avec la mesure du PCI, nous essayons de comprendre pourquoi certaines personnes répondent à ce traitement et d'autres non.

#### Quelles sont les limites de ce test ?

La technique est chère. La machine coûte à elle seule un demi million d'euros et son utilisation, compliquée, nécessite des experts. Tant l'acquisition du signal que l'analyse sont longues et délicates. On n'est pas près de l'utiliser en routine en hôpital. Ensuite, on ne peut pas réduire la conscience à un seul chiffre. L'erreur historique a été de croire que la conscience est tout ou rien. C'est plutôt 50 nuances de gris et plusieurs dimensions : la conscience du monde extérieur, du monde intérieur, l'attention, l'éveil, les émotions, la mémoire... La limiter à un chiffre est utile, mais insuffisant. Il faut aussi capter ses dimensions et subtilités.

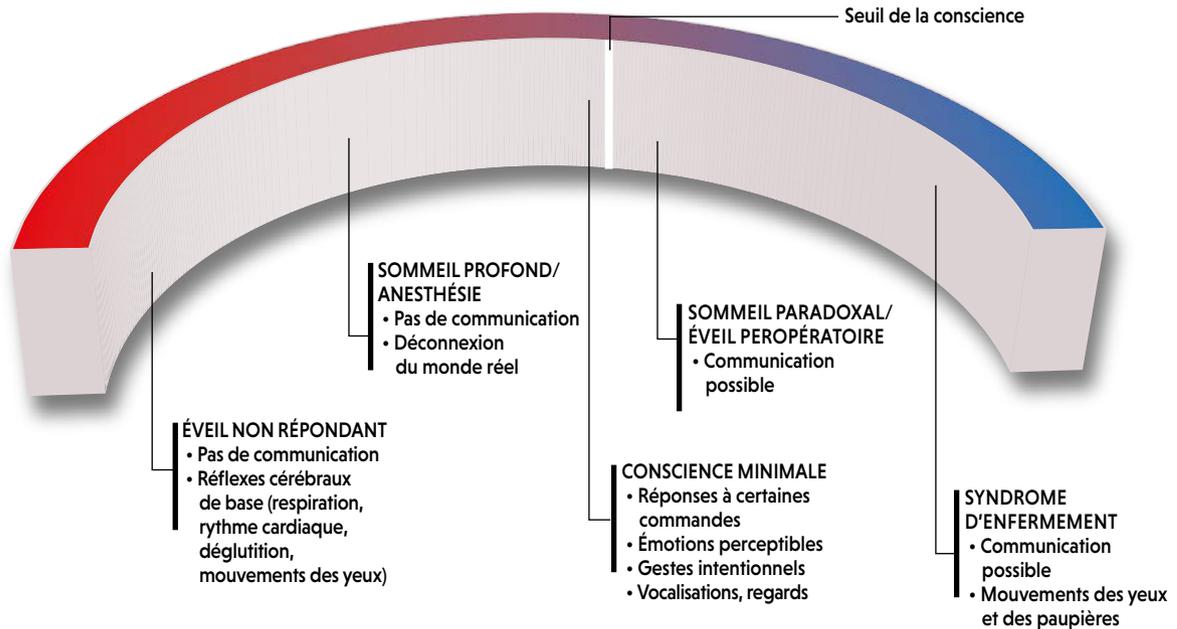
#### Quelles sont les perspectives ?

Chaque semaine, des patients de toute l'Europe sont envoyés dans notre service pour passer ces tests. On travaille ainsi à identifier quel test est nécessaire pour quel type de patient afin de rationaliser leur prise en charge, aussi bien pour leur rééducation que pour les décisions très difficiles d'arrêt de traitement ou de fin de vie. On s'aperçoit malheureusement que beaucoup de ces patients sont négligés. Dans certaines régions, notamment en France, on ne trouve pas de centre de rééducation. Une priorité est de leur assurer un parcours de rééducation, des centres pour les accueillir, puis des maisons de repos et de soin, l'accompagnement au domicile. Il ne suffit pas de mesurer un PCI.

On travaille aussi avec des chercheurs du *Human Brain Project*, ce projet européen visant à modéliser la conscience, qui vont tester notre technique chez l'animal et même sur des ordinateurs. Nous menons enfin des études avec des experts en méditation bouddhique, dont Matthieu Ricard, le seul qui ait réussi à modifier volontairement son PCI, afin non seulement de mieux comprendre les effets de la méditation sur le cerveau, mais aussi de tester nos théories sur la conscience. ■



Pour déterminer le niveau de conscience, l'équipe de Steven Laureys applique au sujet une stimulation magnétique transcrânienne et mesure par électroencéphalographie sa réponse cérébrale, dont elle quantifie la complexité.



> des années, savoir si leur proche est présent mentalement change considérablement la donne.

La situation est moins ambiguë pour les patients en état de conscience minimale. Incapables de parler, ils sont néanmoins en mesure de répondre à certaines commandes, mais souvent de manière imperceptible, imprévisible et entrecoupée de longs silences; de pleurer ou de sourire légèrement dans les situations émotionnelles appropriées; de vocaliser ou d'esquisser un geste de temps à autre ou de suivre des objets du regard. Pour ces patients, l'hypothèse est qu'ils ressentent quelque chose de façon minimaliste, au moins à certains moments.

La seconde classe de patients dont les médecins ont besoin d'évaluer la conscience est totalement différente. Il s'agit d'individus comme vous et moi, dont le cerveau fonctionne normalement et qui subissent une intervention chirurgicale, que ce soit pour retirer une tumeur, réparer un genou ou soigner une autre partie du corps. Pendant quelques heures, l'anesthésie élimine la douleur et autres expériences conscientes, évite le mouvement et stabilise le système nerveux autonome, qui contrôle la respiration et d'autres fonctions.

Les patients semblent en espérant ne pas se réveiller pendant la chirurgie et ne pas avoir à affronter, plus tard, des souvenirs traumatisants de l'opération qui pourraient les hanter toute leur vie. Malheureusement, cet objectif n'est pas toujours atteint. On estime que le réveil de la conscience sous anesthésie, ou «éveil peropératoire», survient dans environ 1 cas sur 1000, en particulier quand, durant une procédure, un anesthésiste paralyse le patient pour faciliter son intubation ou prévenir le mouvement des muscles. Aux États-Unis, des millions de personnes subissent chaque année

On sait aujourd'hui que la conscience n'est pas binaire. Il existe un large éventail d'états de conscience, entre la perte totale de conscience et l'état éveillé du sujet sain. Quelques états ont été décrits (*ci-dessus*), mais même au sein de chacun, des variations existent...

une anesthésie générale (elles sont plusieurs millions en France aussi); on compte donc des milliers d'éveils peropératoires.

Actuellement, les électroencéphalogrammes effectués durant une opération surveillent la profondeur de l'anesthésie. Mais parmi la vaste gamme d'agents anesthésiques, aucun n'agit de la même façon sur l'ensemble des patients – des nouveau-nés aux personnes âgées. Il faudrait un outil capable de détecter la conscience chez chaque individu et dans un large spectre d'états: normaux et pathologiques, aigus (anesthésie) et chroniques.

## LA NATURE DE L'EXPÉRIENCE CONSCIENTE

Pour détecter la conscience, il est nécessaire de prendre en compte deux caractéristiques essentielles de toute expérience subjective, qu'elle soit banale ou hors du commun. D'abord, par définition, chaque expérience est unique. Elle est propre au lieu et au moment où elle survient. Chacune contient énormément d'informations. Prenez par exemple la richesse visuelle d'une randonnée dans les Rocheuses ou d'une autre dans la chaîne des Cascades, aux États-Unis. Combinez ensuite ces images avec d'autres entrées sensorielles, comme les sons et les odeurs, les émotions et les souvenirs associés à l'une ou l'autre randonnée. Chaque randonnée est ainsi distincte à sa manière. Ensuite, chaque expérience forme un tout indissociable. On ne peut séparer ce que l'on a ressenti en voyant la fumée noire s'élever au-dessus des tours jumelles

le 11 septembre 2001 en une demi-expérience de la tour Nord et une autre de la tour Sud.

Actuellement, la théorie de la conscience la plus prometteuse qui réunisse ces deux caractéristiques est la théorie de l'information intégrée. Imaginée par Giulio Tononi, psychiatre et neuroscientifique à l'université du Wisconsin à Madison, cette théorie, formalisable mathématiquement, souligne les caractères différenciés et intégrés de toute expérience subjective et postule que le mécanisme soutenant l'expérience consciente dans le néocortex du cerveau humain doit incorporer ces deux attributs. En d'autres termes, elle postule qu'à chaque propriété associée à une expérience correspond une propriété du système cérébral de la conscience, qui en est la cause. Ainsi, à chaque expérience (représentée par l'ensemble des propriétés qui lui sont associées) correspond une structure physique complexe irréductible responsable de cette expérience. Giulio Tononi a traduit ces idées en un calcul formel qui fournit une mesure de l'irréductibilité de cette structure complexe. Et puisqu'il y a correspondance avec l'expérience vécue, cette mesure reflète la qualité de celle-ci, c'est-à-dire la qualité de l'information engrangée.

Pour tester cette théorie, Giulio Tononi, le neurologue et neuroscientifique Marcello Massimini, aujourd'hui à l'université de Milan, en Italie, et leurs collègues ont conçu dans les années 2000 une méthode fondée sur l'EEG.

## Le cerveau en sommeil profond se comporte comme une cloche mal accordée

Celle-ci fournit une approximation très grossière du calcul formel de la théorie de l'information intégrée. L'équipe a vérifié sa pertinence en l'utilisant, avec succès, pour déterminer si six volontaires en bonne santé étaient conscients et se reposaient les yeux fermés, ou s'ils étaient profondément endormis et donc inconscients.

Le cerveau d'une personne profondément endormie se comporte comme une cloche mal accordée: alors que l'amplitude initiale du signal enregistré sur l'électroencéphalogramme

est plus grande que durant l'éveil, sa durée est beaucoup plus courte et ce signal ne se propage pas à travers le cortex jusqu'aux régions connectées. Bien que les neurones restent actifs lors du sommeil profond, comme en témoigne la forte réponse dans une région localisée du cerveau, l'intégration a été rompue. Il ne persiste qu'une infime part de l'activité électrique observée dans le cerveau éveillé.

Distinguer la réponse du cerveau éveillé ou en sommeil profond peut sembler évident, mais la méthode a été étendue à des tâches autrement plus difficiles où il s'agit de différencier toute une variété d'états cérébraux. Ainsi, dans les années qui ont suivi la mise au point de la méthode, Giulio Tononi, Marcello Massimini et dix-sept autres médecins et neuroscientifiques, dont Steven Laureys, du Coma Science Group, à Liège, ont testé la procédure chez nombre d'autres sujets et publié leurs résultats en 2016 (voir l'encadré pages 30 et 31).

### STIMULER, ENREGISTRER, COMPRESSER

La méthode, nommée stimulation magnétique transcrânienne, consiste à stimuler le cerveau (*zap the brain* en anglais) en envoyant une impulsion magnétique via une bobine de fil électrique confinée et maintenue contre le cuir chevelu. Cette technique induit un bref courant électrique dans les neurones corticaux sous-jacents. Ces neurones entraînent à leur tour d'autres neurones dans une cascade qui se répercute dans le cerveau jusqu'à ce que le courant électrique disparaisse, en une fraction de seconde. Imaginez le cerveau comme une grande cloche dont le battant serait la stimulation magnétique transcrânienne. Une fois frappée, une cloche bien accordée fera retentir sa note pendant un temps considérable, comme le fait le cerveau éveillé.

L'activité électrique du cerveau est enregistrée au moyen d'un casque d'EEG à haute densité porté par le patient. L'expérience est reproduite environ deux cents fois pour une même région corticale stimulée et répétée sur différentes régions. Dans un cerveau éveillé, dont la connectivité est intacte, le suivi des différentes régions cérébrales en réponse à la stimulation révèle, dans la majeure partie du cortex, une activité ni totalement prévisible ni complètement aléatoire, emblématique de ce que l'on qualifie de complexe. Les chercheurs estiment sa complexité, c'est-à-dire le degré de variation de la réponse à travers le cortex et le temps, en utilisant une mesure mathématique saisissant cette diversité. Empruntée à l'informatique, la technique s'appuie sur l'algorithme de compression «zip» qui réduit la taille de stockage des images et des films. D'où le nom de *zap and zip* donné dans le milieu à l'ensemble de la procédure.

> Dans la dernière étape, on associe une valeur à la réponse cérébrale de chaque personne ainsi estimée: l'indice de complexité perturbative (*perturbational complexity index* ou PCI). Si le cerveau ne réagit pas à la stimulation magnétique – par exemple quand l'activité corticale est supprimée ou très faible –, le PCI est proche de 0. Si, en revanche, la complexité de la réponse cérébrale est maximale, le PCI vaut 1. Plus le PCI est élevé et plus la réponse du cerveau à l'impulsion magnétique est variée.

## NEUF PATIENTS NON RÉPONDANTS, MAIS CONSCIENTS

Le principe de l'étude de 2016, qui impliquait des patients de cliniques spécialisées en Belgique et en Italie, est simple. Dans un premier temps, la procédure *zap and zip* a été appliquée à une population contrôle afin d'en déduire une valeur seuil – notée PCI\* – au-dessus de laquelle le sujet est supposé conscient. Dans tous les cas où il est possible d'établir avec certitude que le sujet est conscient, le PCI de cette personne doit être supérieur au PCI\* et dans tous les cas où le sujet est inconscient, son PCI doit être inférieur à ce seuil. Cette procédure établit le PCI\* comme un seuil critique – la valeur minimale associée à une activité cérébrale complexe – au-delà duquel la conscience est décelée. Dans un second temps, ce seuil a été utilisé pour déduire si des patients dont le diagnostic de conscience ne peut être posé avec les méthodes conventionnelles étaient conscients.

La population de référence utilisée pour calibrer la procédure comprend deux groupes. L'un est constitué de 102 volontaires en bonne santé suivis dans différents états conscients et inconscients. Pour les états conscients, les sujets étaient éveillés ou en train de rêver durant le sommeil paradoxal (les chercheurs vérifiaient que le sujet était conscient en le réveillant à un moment aléatoire de cette période du sommeil: les électroencéphalogrammes n'étaient inclus dans les résultats finaux que si le sujet rapportait avoir rêvé juste avant son réveil). Les électroencéphalogrammes ont aussi été pratiqués sur des sujets sains anesthésiés avec de la kétamine, un agent pharmacologique qui déconnecte l'esprit du monde extérieur sans éteindre la conscience (à faible dose, la kétamine est utilisée comme drogue hallucinogène, connue sous le nom de vitamine K).

Pour les états inconscients, l'électroencéphalogramme a été mesuré pendant le sommeil lent profond (lorsque les participants ne rapportaient aucun rêve juste avant leur réveil par l'équipe) et sous une anesthésie semblable à celles pratiquées en chirurgie, produite à l'aide de trois agents différents (le midazolam, le xénon et le propofol). L'étude a aussi inclus

48 patients atteints de lésions cérébrales, mais répondants, qui ont été évalués pendant l'éveil: ils constituent les sujets témoins.

Les chercheurs ont découvert que la présence de la conscience pouvait être déduite avec exactitude chez chacun des sujets pour un PCI\* de 0,31. En d'autres termes, pour chacune des 540 conditions testées, si la réponse électrique était inférieure à ce seuil, le sujet était inconscient. Sinon, il était conscient. Les 150 sujets – les volontaires en bonne santé comme les patients atteints de lésions cérébrales – ont été correctement classés. Cette réussite est remarquable étant donné la diversité de la cohorte en termes de genre, d'âge, de régions cérébrales stimulées et de conditions médicales et comportementales.

L'équipe a ensuite appliqué le *zap and zip* avec cette valeur seuil à un autre groupe de participants atteints de graves troubles de la conscience: des patients en état de conscience minimale ou d'éveil non répondant. Chez les premiers, la méthode a correctement attribué une conscience à 36 des 38 patients, et mal diagnostiqué les deux autres comme inconscients. Parmi les 43 patients non répondants, 34 ont affiché une réponse cérébrale dont la complexité était inférieure à celle de la population de référence à l'état conscient – un résultat attendu. La complexité de leurs électroencéphalogrammes était comparable à celle du groupe de référence quand aucune conscience n'était détectée.

Les résultats obtenus avec les 9 autres patients non répondants étaient bien plus troublants. La réponse de ces patients aux impulsions magnétiques était un signal électrique complexe qui les situait au-dessus du seuil. En d'autres termes, la complexité de leur réponse cérébrale était aussi élevée que celle des sujets conscients de la population de référence. Ces patients pourraient donc ressentir quelque chose, bien qu'ils soient incapables de communiquer avec le monde extérieur et leurs proches.

Comme toute expérience couronnée de succès, celle-ci ouvre la voie à de nouvelles interrogations. Comment améliorer la méthode du *zap and zip* pour qu'elle soit totalement fiable chez les patients en état de conscience minimale? Quel résultat donnerait-elle sur d'autres groupes de patients, comme des individus en catatonie (le dernier stade de la démence), les nouveau-nés ou les jeunes enfants? Des analyses psychologiques ou comportementales pourraient-elles corroborer la conscience détectée chez les patients non répondants? Cette méthode serait-elle une piste vers un outil pronostic, capable d'indiquer si certains patients non répondants sont sur la voie de la guérison? Toutes ces questions nécessitent d'être saisies à bras-le-corps. Souhaitons que cette étape majeure vers la compréhension des liens entre corps et esprit... stimule nombre de corps et d'esprits. ■

## BIBLIOGRAPHIE

Silvia Casarotto et al., **Stratification of unresponsive patients by an independently validated index of brain complexity**, *Annals of Neurology*, vol. 80(5), pp. 718-729, 2016.

A. G. Casali et al., **A theoretically based index of consciousness independent of sensory processing and behavior**, *Science Translational Medicine*, vol. 5(198), 198ra105, 2013.

O. Gosseries et S. Laureys, **La conscience, comment la déceler ?**, *Pour la Science*, n° 422, pp. 106-112, 2012.

M. Massimini et al., **Breakdown of cortical effective connectivity during sleep**, *Science*, vol. 309, pp. 2228-2232, 2005.

# ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**



FORMULE **INTÉGRALE**  
-41%



99€

FORMULE **PASSION**  
-27%



79€

FORMULE **DÉCOUVERTE**  
-25%



59€

## BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné 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** POUR 1 AN, JE CHOISIS MA FORMULE CI-DESSOUS :

FORMULE **INTÉGRALE**  
12 n° de *Pour la Science* + 4 Hors-Séries  
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996

11A99E

99€  
Au lieu de 168,45€\*

FORMULE **PASSION**  
12 n° de *Pour la Science*  
+ 4 Hors-Séries

P1A79E

79€  
Au lieu de 108,45€\*

FORMULE **DÉCOUVERTE**  
12 n° de *Pour la Science*

D1A59E

59€  
Au lieu de 78,45€\*

### J'INDIQUE MES COORDONNÉES

M.  Mme

Nom : \_\_\_\_\_ Prénom : \_\_\_\_\_

Adresse : \_\_\_\_\_

Code postal \_\_\_\_\_ Ville : \_\_\_\_\_

Téléphone \_\_\_\_\_

• Mon e-mail : (à remplir en majuscule) \_\_\_\_\_@\_\_\_\_\_

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science*  OUI  NON  
et de ses partenaires  OUI  NON

• Je choisis mon mode de règlement :

Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

Par carte bancaire

N° \_\_\_\_\_

Date d'expiration : \_\_\_\_\_ Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB) : \_\_\_\_\_

Signature obligatoire

PAG18483STDIC

\* Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 30/06/2018 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site [www.pourlascience.fr](http://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*. Photos non contractuelles.

**LIONEL  
NACCACHE**

est coresponsable de l'équipe  
PICNIC Lab, à l'Institut du  
cerveau et de la moelle  
épineuse, à Paris



# Le concept même de conscience minimale est à revoir



GRÂCE À DE NOUVELLES APPROCHES COMBINANT  
NEURO-IMAGERIE ET MATHÉMATIQUES, ON ÉVALUE  
DE MIEUX EN MIEUX L'ÉTAT DE CONSCIENCE D'UNE PERSONNE  
– SUFFISAMMENT POUR RÉVISER LA CLASSIFICATION  
DES ÉTATS DE LA CONSCIENCE.

### **Les études sur la conscience se sont multipliées ces 30 dernières années. Qu'est-ce qui a déclenché cet engouement ?**

L'étude de la conscience a connu des hauts et des bas. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, nombre de savants s'interrogeaient sur notre capacité à percevoir et penser le monde, et différentes tentatives de la scientifier cohabitaient, mais chacune avait des écueils. L'école de psychologie expérimentale dite de l'introspection soutenait que pour savoir comment fonctionne la conscience, il suffisait de sonder soi-même son esprit. Mais l'introspection est souvent erronée et des zones de la subjectivité sont insondables; l'école s'est effondrée. D'autres gens se sont juste intéressés aux comportements. Cette école, le behaviorisme, était à l'inverse trop déconnectée du subjectif. La psychanalyse a aussi émergé, sorte de mouvement purement subjectif ne s'intéressant qu'à ce que les gens racontent sur eux-mêmes. Tous ces écueils ont relégué la conscience dans un placard: puisqu'elle était subjective, elle ne pouvait être un objet de la science.

Les choses ont changé dans les années 1970, quand, lors d'expériences psychologiques, on a commencé non seulement à recueillir le rapport subjectif du sujet, mais à le confronter à l'observation du comportement et de l'activité cérébrale. On s'est ainsi aperçu, par exemple, que des patients ayant une lésion dans le cortex visuel de l'hémisphère gauche, même s'ils disaient ne pas voir un visage qui leur était présenté dans leur champ mort, répondaient correctement à la question: «Le visage est-il effrayant ou non?» lorsqu'on les forçait à donner une réponse (on parle de vision aveugle). La conscience est alors devenue une variable expérimentale que l'on pouvait croiser avec des données comportementales ou d'imagerie.

### **Plusieurs théories de la conscience ont alors émergé. Quelles sont-elles ?**

Parmi les principales théories, il y a celle de Giulio Tononi, de l'université du Wisconsin, à Madison, souvent vue comme une très belle mathématisation, mais aussi parfois comme un peu spéculative, les conditions de calculabilité du paramètre qu'elle produit étant souvent impossibles à déterminer dans un vrai cerveau. Cette théorie formalise la conscience en termes de traitement de l'information, notamment en considérant deux paramètres, l'intégration et la différenciation: un cerveau conscient doit être capable d'intégrer de grandes quantités d'informations, c'est-à-dire de mettre en relation des opérations de domaines différents, et en même temps de différencier des états, par exemple de distinguer un visage entre mille. Cette théorie est intéressante, mais je trouve qu'elle n'est pas assez imprégnée d'une psychologie de la conscience et assez décorrélée du fonctionnement du cerveau.

Bien sûr, l'équipe de Giulio Tononi essaye de la reconnecter au cerveau. Le travail de Marcello

Massimini, commencé dans son laboratoire, illustre cette entreprise avec succès (*voir l'article page 26*). Et les résultats obtenus rejoignent ce que notre laboratoire et d'autres ont publié avec des méthodes différentes. Une idée clé est qu'il n'y a pas une région du cerveau dédiée à la conscience. En revanche, plusieurs études ont montré qu'il est possible d'activer chaque région du cortex de manière inconsciente, par exemple avec des images subliminales: un mot active telle région, un nombre telle autre, etc. La signature de la conscience semble être l'existence d'un mode de communication entre les régions.

La théorie que nous avons développée avec Stanislas Dehaene, directeur du Laboratoire de neuro-imagerie cognitive à NeuroSpin au CEA (Saclay), et nos collègues a l'avantage d'être très proche de son objet, à la fois psychologique et cérébral. Dans les années 1990, le psychologue Bernard Baars, à l'Institut des neurosciences de La Jolla, en Californie, avait proposé un modèle purement psychologique de la conscience, nommé l'espace de travail global. Initialement, Stanislas avait commencé à travailler avec Jean-Pierre Changeux à un modèle inspiré de celui de Bernard Baars, mais avec un substrat neuronal, en s'intéressant à l'effort mental. Quand j'ai rejoint Stanislas durant ma thèse, nous avons croisé ces éléments et proposé un modèle neuronal des idées de Bernard Baars.

### **En quoi consiste cet espace de travail neuronal ?**

Ce modèle est fondé sur l'idée qu'il existerait deux architectures cérébrales dans le cerveau. La première serait constituée de systèmes indépendants les uns des autres et donc capables de fonctionner en parallèle. Cela expliquerait que des centaines de processus différents aient lieu dans notre cerveau en permanence, reposant sur des réseaux neuronaux qui fonctionnent en parallèle parce qu'ils ne sont pas massivement interconnectés. Ce premier espace est dit modulaire.

La seconde architecture serait un système non modulaire qui briserait la modularité: imaginez un réseau de nombreux neurones très interconnectés. À chaque instant, un tel réseau ne peut loger qu'une représentation. Ce système serait le réseau de la conscience. On a beaucoup appris sur la conscience depuis un siècle, notamment qu'on ne peut avoir conscience de plusieurs choses en même temps. L'espace non modulaire reflète bien cette idée: à un moment, l'espace global saisit une scène. Mais parallèlement, de nombreuses informations sont traitées inconsciemment et indépendamment. Chacun des constituants de ce réseau global est dans les régions plutôt associatives du cortex, celles qui, comme les cortex préfrontal et pariétal, communiquent avec les autres régions corticales. Il faut imaginer ce réseau comme un filtre présent un peu partout, mais avec une densité particulière. Chaque bout de ce réseau peut fonctionner >

> inconsciemment. La conscience apparaît quand ces différentes régions fonctionnent ensemble, de manière intégrée. Ce n'est pas toujours le cas.

### Quelles approches avez-vous utilisées pour tester ce modèle ?

Par exemple, en 2001, nous avons comparé en imagerie par résonance magnétique (IRM) ce qui se passe lorsqu'une personne voit consciemment un mot *versus* quand la perception de ce mot devient subliminale. On a alors observé qu'en perception subliminale, seule la région de la lecture s'active, signe qu'il y a une forme de lecture inconsciente du mot. En revanche, de multiples régions s'activent quand le mot est lu consciemment, dont les régions frontopariétales et celle de la lecture.

Toutefois, l'IRM est une technique lente, qui ne fournit que la somme de l'activité cérébrale pendant une seconde. En 2009, pour savoir si tout s'activait en même temps ou de façon séquentielle, nous avons reproduit l'expérience avec des patients qui avaient des électrodes implantées dans le cerveau pour soigner leur épilepsie. Chaque électrode permet de suivre en direct l'activité dans la région de l'implant. Par chance, une électrode pointait sur la région de la lecture. Résultat: quand la perception du mot est subliminale, cette électrode a une belle réponse précoce et locale, qui disparaît ensuite. Quand le patient voit le mot consciemment, le point intéressant est que la première étape est exactement la même. Elle n'est donc pas consciente puisqu'elle a lieu dans les deux cas. En revanche, elle est suivie d'un deuxième état où l'électrode s'active, de même que d'autres de la région frontopariétale, signe que la communication entre les différentes régions du cerveau, notamment celle de la première électrode, a augmenté. Nous avons obtenu un résultat similaire à l'aide de l'électroencéphalographie (EEG) chez des patients non communicants soumis à un test auditif. Tout cela conforte l'idée que la conscience est liée à la diffusion d'une information d'un espace modulaire à un espace non modulaire.

### L'espace modulaire fonctionne-t-il toujours quand on est inconscient ?

Cela dépend. Tout peut avoir été détruit. Mais dans beaucoup de situations, l'espace modulaire continue de fonctionner. On le voit par diverses techniques comme l'EEG, l'IRM, les caméras à positrons. Un des premiers travaux de Steven Laureys, du Coma science group, à Liège, sur des patients en état végétatif a montré que si on leur envoie des chocs électriques sur la main, leur cortex sensitif primaire continue souvent de traiter l'information, mais n'est plus capable de communiquer avec le cortex pariétal postérieur, une région importante de l'espace de travail global et de la conscience de soi. Nous avons obtenu des résultats similaires avec le cortex auditif en

stimulant des personnes dans le coma ou en sommeil profond avec des sons ou des mots: des modules continuaient de travailler de manière très active. Pendant ma thèse, j'avais aussi montré que, de façon inconsciente, on peut traiter le sens d'un mot. Ainsi, la limite n'est pas la complexité psychologique, mais le type de traitement que l'on pourra faire sur ces représentations.

### Comment caractériser alors la différence entre un traitement conscient et inconscient ?

À partir du moment où vous êtes conscient d'une information, par exemple d'un mot, vous êtes capable de lui faire subir tout ce que vous êtes capable de faire mentalement: décider de construire une phrase avec, de l'épeler, de compter la valeur numérique de ses lettres, d'en faire une anagramme, de le traduire dans une autre langue, etc. En d'autres termes, quand une information très spécialisée arrive sur la scène de votre espace de travail, vous pouvez la faire circuler dans toutes vos facultés mentales. Dans les états inconscients, en revanche, on peut traiter de manière très efficace beaucoup d'informations, mais on n'aura pas cette souplesse. Cela correspond bien à l'idée que toute l'information peut circuler dans un espace cérébral branché sur toutes vos facultés.

### Pour Steven Laureys, il existerait non pas un, mais deux réseaux neuronaux globaux anti-corrélés, l'un se rapportant à la conscience de soi, l'autre à la conscience perceptive. Qu'en pensez-vous ?

Au sein de l'espace de travail global, tous les neurones ne font pas la même chose en même temps. Imaginez une salle avec 100 personnes. Si chacune parle avec 2-3 personnes, elles forment de petits groupes apparentés à nos modules. Toutes ces discussions parallèles font une sorte de brouhaha qui correspond au bruit de fond du cerveau. Mais si brutalement vous passez dans un mode de conversation unifiée, où une personne s'adresse à tout le monde à la fois, l'information, qui au début se trouvait dans un module, se propage. Les modules travaillent de façon cohérente tout en gardant chacun sa personnalité, sa capacité de traiter l'information, de l'échanger.

## En vision subliminale d'un mot, seule la région de la lecture s'active

### GLOSSAIRE

#### ÉTAT VÉGÉTATIF

La personne est éveillée et ses fonctions végétatives – respiration, température, circulation sanguine, digestion... – sont préservées (d'où le nom), mais elle n'est pas consciente.

#### ÉTAT DE CONSCIENCE MINIMALE

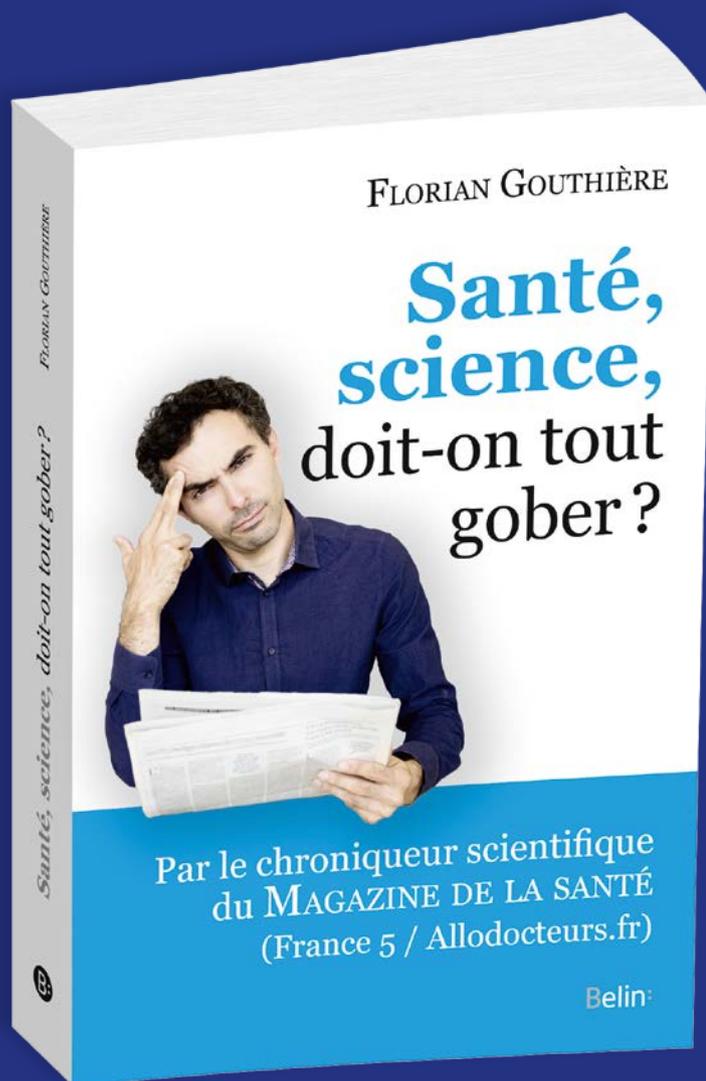
La personne présente des comportements bien plus riches que dans l'état végétatif. Par exemple, elle répond à certaines commandes ou suit des yeux un miroir. Pour autant, on ne peut communiquer avec elle.

#### SYNDROME D'ENFERMEMENT

La personne est consciente, mais totalement paralysée, en dehors des yeux qui lui permettent de communiquer et d'exprimer ainsi son vécu conscient.

# Santé, science, doit-on tout gober ?

FLORIAN GOUTHIÈRE



## Comment distinguer le faux de l'info ?

belin-editeur.com



**Belin:**  
ÉDITEUR

> La conscience apparaît alors, mais chaque module garde sa spécificité. Les idées de Steven Laureys s'intègrent tout à fait dans cette logique: certaines parties de l'espace de travail auront plus à voir avec la prise de conscience du monde extérieur, d'autres avec la conscience de soi.

Si tous les neurones faisaient la même chose en même temps – la théorie de Giulio Tononi le décrit bien –, on aurait une grande intégration, mais aucune différenciation, car l'information serait très peu complexe. Cela s'appelle une crise d'épilepsie. On peut donc perdre conscience de deux façons: soit par manque de communication dans le réseau – c'est ce que l'on voit malheureusement chez des patients dont les fibres de connexion sont détruites –, soit à cause d'un excès de communication. La conscience exige donc d'être dans une fenêtre de communication.

### Cherchez-vous à concevoir un « conscienciomètre », comme Marcello Massimini et ses collègues ?

Oui, bien sûr. En 2014, avec Jacobo Sitt, Jean-Remi King et d'autres, nous avons mis au point un algorithme qui prédit si un sujet est dans un état végétatif ou de conscience minimale. Nous avons entraîné notre algorithme avec deux populations: disons 50 patients en état végétatif et 50 en conscience minimale. On enregistre l'EEG de chaque patient soumis à un stimulus auditif ou non, puis on classe ces EEG à l'aide de 92 « marqueurs », des motifs qui conditionnent le classement. Dans l'hyperespace de ces marqueurs, l'algorithme calcule un hyperplan qui sépare les deux populations. Puis, quand on lui présente un nouveau patient, il est alors capable de dire de quel côté est ce dernier. Nous sommes en train de comparer nos résultats avec ceux de Marcello Massimini.

### Comment être sûr que la population de référence est bien caractérisée ?

On part d'un examen clinique devenu le standard, notamment une échelle, la CRS-R (*Coma recovery scale-revised*), qui classe les patients selon leur comportement. On complète avec l'EEG, l'IRM fonctionnelle, la tomographie à émission de positrons. Et quand toutes ces mesures convergent, on sait que le sujet étudié est bien caractérisé. Si ce n'est pas le cas, le patient n'entre pas dans la population de référence, et c'est justement pour mieux diagnostiquer ces cas difficiles que l'algorithme pourrait être utile. En fait, le concept même de conscience minimale est à revoir. Dans nos échelles cliniques, dès lors que par un mouvement de tête ou des yeux, par exemple, on obtient une communication fonctionnelle avec un malade, il n'est plus en conscience minimale: il est conscient. Ce qu'on appelle conscience minimale est un état seulement décrit par des comportements ne permettant pas de

# La conscience exige ni trop ni trop peu de communication cérébrale

communiquer. On a aucune idée de ce que vit le patient: on n'y a pas accès. Or la plupart des gens imaginent des patients conscients, mais paralysés, ce qui n'a rien à voir.

### Que proposez-vous ?

L'échelle CRS-R différencie un état purement végétatif d'un autre état: il suffit d'un seul comportement – des mouvements reproductifs à la commande, par exemple – pour dire qu'il s'agit d'un état de conscience minimale. En analysant les comportements pris en compte, je me suis aperçu que, quand un patient est classé végétatif, ses comportements sont liés à une activité sous-corticale. Mais dès qu'on est classé en conscience minimale, le comportement requiert une activité corticale. Je propose donc de parler d'état médié par le cortex. L'information est importante, car plus le cortex participe au comportement, plus la probabilité que le patient soit conscient est grande. Je propose aussi une nouvelle classification qui ferait intervenir non seulement l'examen comportemental, mais certains marqueurs approchant de près la frontière de la conscience, comme l'indice PCI de Marcello Massimini.

### Quelles sont les perspectives pour les patients ?

Si les réseaux corticaux sont détruits, on aura beau les stimuler, leur état ne s'améliorera pas. En revanche, s'ils sont partiellement préservés, plusieurs techniques sont envisageables. Actuellement, la pharmacologie doit progresser. La technique la plus invasive est la stimulation cérébrale profonde. En 2007, l'équipe de Nicholas Schiff, au Weill Cornell Medical College, à New York, a amélioré l'état d'un patient en stimulant son thalamus. Elle devrait reprendre ses travaux bientôt. Une technique intermédiaire est la stimulation du nerf vague, encourageante elle aussi. La moins invasive est la stimulation électrique transcrânienne, que notre équipe et d'autres, dont celle de Steven Laureys, sont en train de tester: vous placez des électrodes et vous dépolarisez le cortex pour l'activer. Nous avons deux essais encourageants en cours.

Propos recueillis par Marie-Neige Cordonnier

## BIBLIOGRAPHIE

L. Naccache, **Minimally conscious state or cortically mediated state ?**, *Brain*, awx324, 2017. <https://doi.org/10.1093/brain/awx324>

J. D. Sitt et al., **Large scale screening of neural signatures of consciousness in patients in a vegetative or minimally conscious state**, *Brain*, vol. 137, pp. 2258-2270, 2014.

S. Dehaene, **Le Code de la conscience**, Odile Jacob, 2014.

L. Naccache, **Le Nouvel Inconscient**, Odile Jacob, 2006.





La surface de Pluton présente une impressionnante variété de teintes et d'aspects, comme le montre cette vue en couleurs renforcées prise par la sonde *New Horizons* en 2015.

## L'ESSENTIEL

> Après plusieurs péripéties et une longue maturation du projet, la sonde spatiale *New Horizons* a été lancée en 2006 pour explorer le système de Pluton.

> Elle a survolé Pluton en été 2015. Ce survol a montré que cette petite planète et ses lunes sont bien plus complexes et actives qu'attendu.

> Pluton présente de hautes montagnes, de vastes glaciers et une atmosphère bien plus riche et épaisse qu'on ne pensait. Même ses lunes montrent des structures étonnantes, comme la calotte polaire rouge de l'une d'entre elles ou des canyons.

> L'exploitation des données de *New Horizons* se poursuit.

## L'AUTEUR



**ALAN STERN**  
planétologue au Southwest Research Institute, aux États-Unis, et chercheur principal sur la mission *New Horizons*

# Les faces cachées de Pluton

LA MISSION SPATIALE *NEW HORIZONS* A TOUT CHANGÉ À CE QUE NOUS CROYIONS SAVOIR SUR LA NEUVIÈME PLANÈTE.

**I**l était bientôt 21 heures ce 14 juillet 2015. En compagnie de Charles Bolden, l'administrateur de la Nasa, j'attendais dans la salle de contrôle du laboratoire de physique appliquée de l'université Johns-Hopkins, dans le Maryland. Une minute encore et le premier signal de *New Horizons* devait nous parvenir. À quelque 5 milliards de kilomètres de nous, cette sonde de la Nasa venait de survoler Pluton et ses cinq lunes. Le premier et unique survol de ce genre jamais tenté!

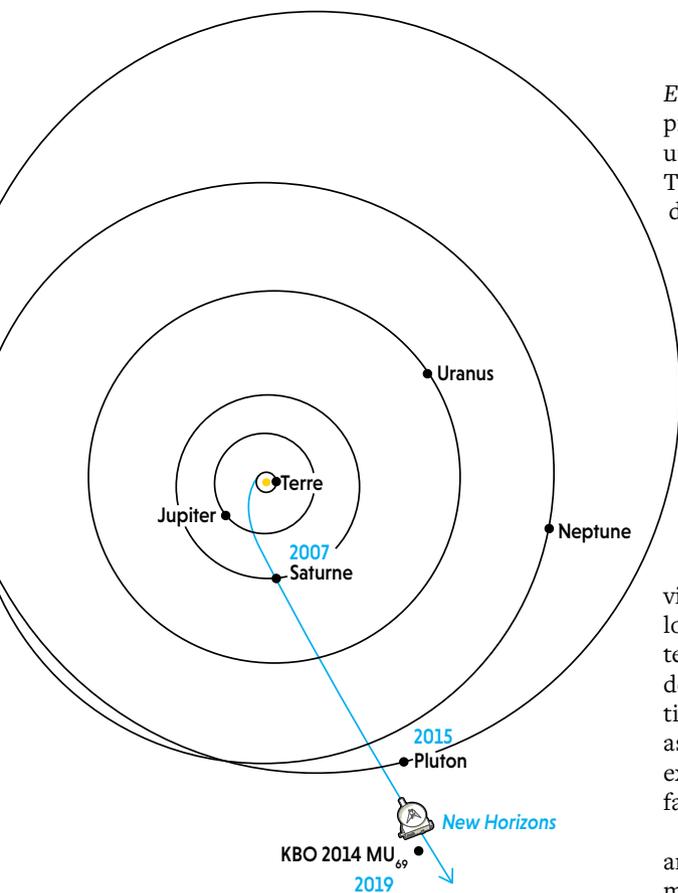
Filant à la vitesse de la lumière vers les antennes géantes de la Nasa, le signal de la sonde devait nous apprendre si le survol du système plutonien avait réussi. Allait-il seulement arriver? Pour révéler quoi?

À proximité de nous, près de 2000 invités attendaient aussi, tandis que partout sur la planète une multitude de passionnés suivaient l'événement à la télévision ou en ligne. Il nous avait fallu vingt-sept années pour en arriver là: quatorze années pour «vendre» le projet, quatre

de plus pour construire la sonde et la lancer, et neuf pour lui faire traverser le Système solaire. Directeur du projet, j'attendais avec mes équipes le signal qui, après tant d'efforts, allait nous apprendre si nous avions réussi ou échoué.

Soudain, le signal arriva. Les ordinateurs commencèrent à le décoder puis, très vite, les immenses baies de la salle de contrôle se mirent à afficher une à une les informations résumant l'état de notre vaisseau. L'un après l'autre, nos ingénieurs de vol vinrent confirmer le bon fonctionnement de chacun des systèmes de bord. Notre sonde avait survécu au survol de Pluton et était toujours en parfait état de marche. Les vivats fusèrent dans la salle et les bras se levèrent en agitant des drapeaux; on s'étreignait entre voisins. Au bout de presque trente ans, notre visite de l'objet céleste le plus éloigné jamais abordé – en quelque sorte l'Everest de l'exploration planétaire – était un succès!

Dès le lendemain matin, de premières images en haute résolution de Pluton étaient disponibles. Elles révélaient l'inattendue >



Les planètes représentées dans leur position de 2017.

> complexité de cette petite planète. Les données prélevées par la sonde continuèrent à arriver pendant les jours et les mois suivants jusqu'à la fin de 2016. Grâce à ses sept instruments scientifiques, *New Horizons* a réalisé au total plus de 400 observations distinctes. Une moisson considérable, qui représente 5000 fois plus de données que celles recueillies en 1965 par la première mission martienne, *Mariner 4*.

Ce riche ensemble de données a radicalement changé notre connaissance de Pluton, et nous prouve qu'une petite planète peut être beaucoup plus complexe et mettre beaucoup plus d'énergie en jeu qu'attendu. Par ailleurs, les réactions du public nous ont ravis et surpris par leur ampleur : presque 500 unes de journaux, des dizaines d'articles dans des magazines, plus de 2 milliards de pages vues sur notre site web...

## NAISSANCE DU PROJET EN 1999

Rétrospectivement, l'énorme intérêt scientifique de l'exploration de Pluton – et la passion du public pour la planétologie – sont évidents. Pour autant, la vérité est que la mission a bien failli ne jamais avoir lieu.

C'est en 1999 que la Nasa fit pour la première fois connaître son intention ferme d'envoyer une sonde vers Pluton. Cette agence invitait des équipes de tous les États-Unis à imaginer des instruments scientifiques de bord pour le projet de sonde *Pluto Kuiper*

*Express (PKE)*. L'équipe que je dirigeais alors proposa une suite instrumentale comportant une caméra principale et un spectromètre. Toutefois, en septembre 2000, le coût estimé de *PKE* se révélait si élevé qu'avant même la sélection des instruments embarqués, la Nasa annula la mission.

Aussitôt, la communauté planétologique s'insurgea contre cette annulation, et demanda à la Nasa de revenir sur sa décision. Le public manifesta aussi sa frustration, écrivant plus de 10000 lettres de protestation et bombardant la Nasa d'appels téléphoniques. Un adolescent alla même jusqu'à traverser le pays en voiture pour supplier personnellement l'agence de relancer l'exploration de la neuvième planète (comme la plupart des planétologues que je connais, je persiste à utiliser le terme de planète pour Pluton dans mes articles de recherche et à l'oral ; autrement dit, je ne tiens pas compte de la définition de l'Union astronomique internationale, qui conduit à exclure Pluton de la liste des planètes, pour en faire une « planète naine »).

Finalement, en décembre 2000, la Nasa a annoncé qu'elle lançait un appel à projets de mission de survol de Pluton. Les propositions devaient viser le survol de la petite planète avant 2020, remplir les mêmes objectifs que ceux assignés à la mission *PKE*... et coûter moitié moins. À la suite de cet appel, la Nasa sélectionna cinq plans détaillés de réalisation de la mission, épais comme des annuaires. Celui de mon équipe en faisait partie. Nous avions nommé *New Horizons* (« nouveaux horizons ») notre version de la mission parce que nous proposons la première exploration planétaire depuis les missions *Voyager* des années 1970.

Installée au *Southwest Research Institute* (institut de recherche du Sud-Ouest, l'un des plus grands et des plus anciens organismes de recherche indépendants aux États-Unis), au Texas, et à l'université Johns-Hopkins – où notre sonde serait construite et testée –, notre équipe avait nettement moins d'expérience en matière de missions planétaires que ses concurrentes.

Nous compensons ce handicap par notre ingéniosité : afin de maîtriser les coûts, nous avons proposé de n'envoyer qu'une seule sonde au lieu de deux, un risque sans précédent s'agissant d'une première mission spatiale vers un corps céleste ; afin de réduire les coûts en termes de personnel, nous avons prévu de mettre la sonde en hibernation pendant les quelque dix années de son voyage vers Pluton ; nous avons ensuite fait le choix de concentrer nos moyens sur les capacités scientifiques du vaisseau plutôt que sur un système de communication capable de transmettre vite

# Le défi : construire en quatre ans une sonde spatiale... avec 20% du budget de Voyager

les données après le survol. Une fois les grandes lignes de notre projet établies, nous l'avons peaufiné et soumis à d'innombrables analyses et révisions, afin de nous assurer qu'il était sans failles à tous égards, depuis la mise en fonctionnement du système jusqu'à la composition de l'équipe scientifique en passant par les plans de secours, de gestion, de communication, de médiation scientifique et de maîtrise des coûts...

Fin novembre 2001, la Nasa annonçait avoir sélectionné *New Horizons*. Nous avions gagné, mais nous étions loin de savoir ce qui nous attendait. Afin d'être prêts pour la fenêtre de lancement de janvier 2006, il nous fallait concevoir, construire et tester notre

sonde en seulement quatre ans et deux mois, alors que le même processus avait pris entre huit et douze ans aux équipes des précédentes missions du même type: *Voyager*, *Galileo* et *Cassini*. Nous ne disposerions en outre que de 20% du budget de *Voyager*...

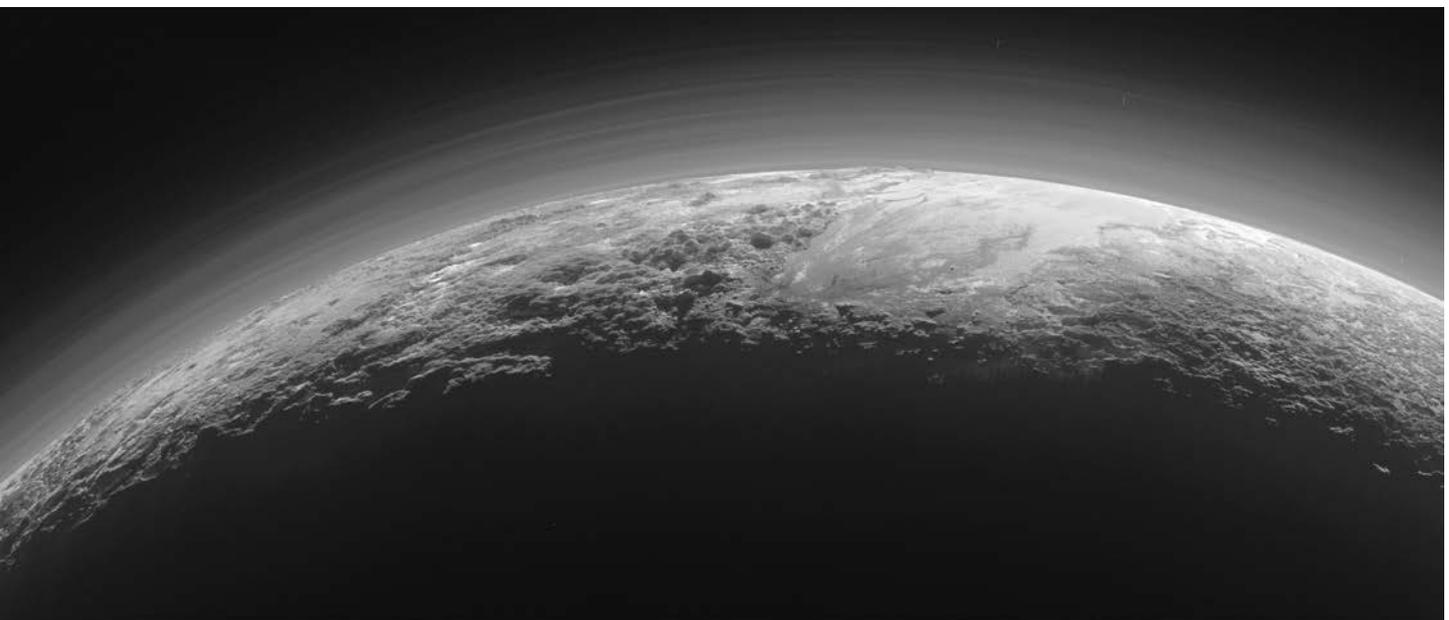
## UNE BATAILLE BUDGÉTAIRE AU CONGRÈS AMÉRICAIN

Au moment où, moins de trois mois après notre sélection, nous allions nous attaquer à ces défis, voilà que le gouvernement de George Bush décida d'annuler la mission *New Horizons*. Il ne l'inscrivit donc pas au budget fédéral publié de l'année, ce qui entraîna une longue bataille budgétaire avec le Congrès. Celle-ci ne s'acheva positivement qu'à l'été 2002, quand l'Académie des sciences américaine fit de l'exploration de Pluton l'une de ses principales priorités décennales.

Toutefois, alors que nous nous croyions sortis d'affaire, deux interruptions de plusieurs mois de l'activité du Laboratoire national de Los Alamos mirent en péril notre approvisionnement en plutonium, le carburant du générateur thermoélectrique à radioisotopes de notre sonde.

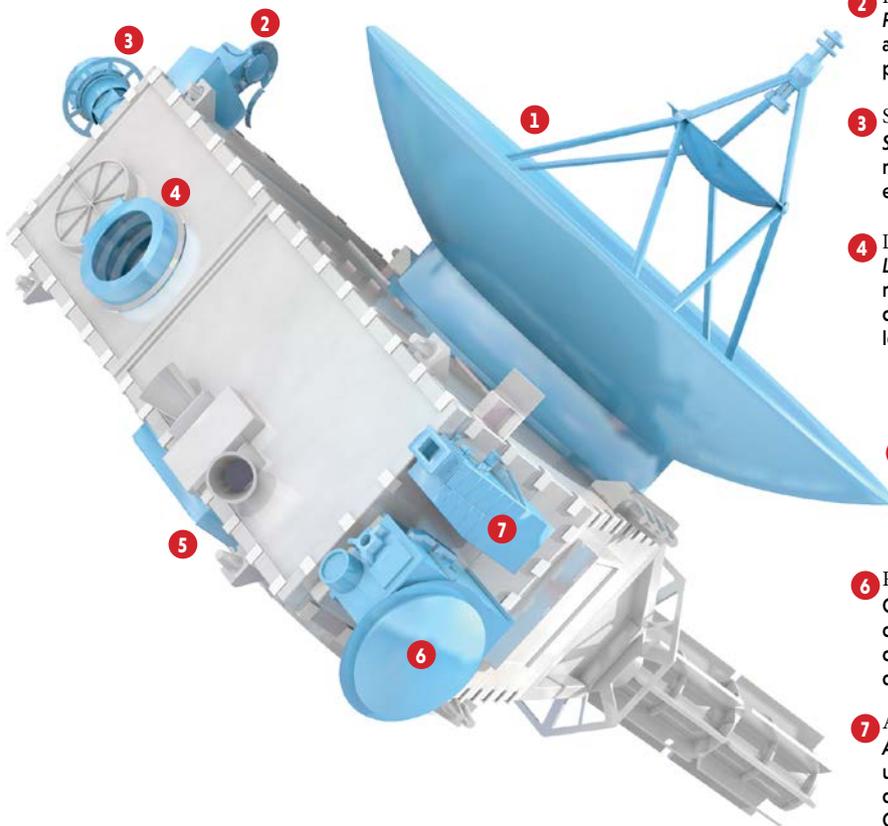
Nombreux furent alors ceux qui, à la Nasa ou chez les chercheurs, pensèrent que jamais *New Horizons* ne survolerait Pluton. Mais pour le rendre possible, nous avons travaillé jour et nuit, semaine et week-ends compris, cinquante-deux semaines par an pendant... quatre ans. Au point que nous avons pu livrer à temps sur le pas de tir une sonde prête à décoller. >

Cette image prise par *New Horizons* révèle la brume atmosphérique qui flotte au-dessus de Pluton. Des montagnes hautes de 4 500 mètres sont visibles à gauche, et des glaciers à droite. On identifie dans la partie supérieure de l'image une étendue lisse de glace d'azote: Sputnik Planitia.



## DES YEUX SUR L'HORIZON

**L**es sept instruments scientifiques embarqués sur *New Horizons* ont été choisis afin de recueillir le plus possible d'informations au cours d'un bref survol du système constitué par Pluton et par ses cinq lunes. Cette suite d'instruments lui permettait de prendre des images en couleur ou en noir et blanc, de faire des mesures spectroscopiques et de température, ainsi que de détecter la poussière et le plasma rencontrés.

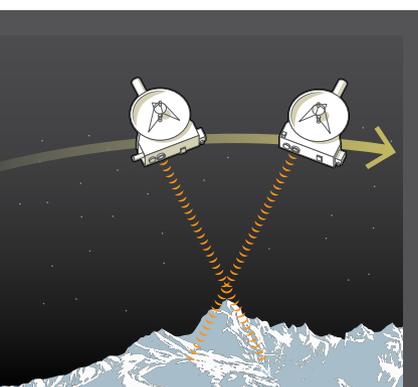
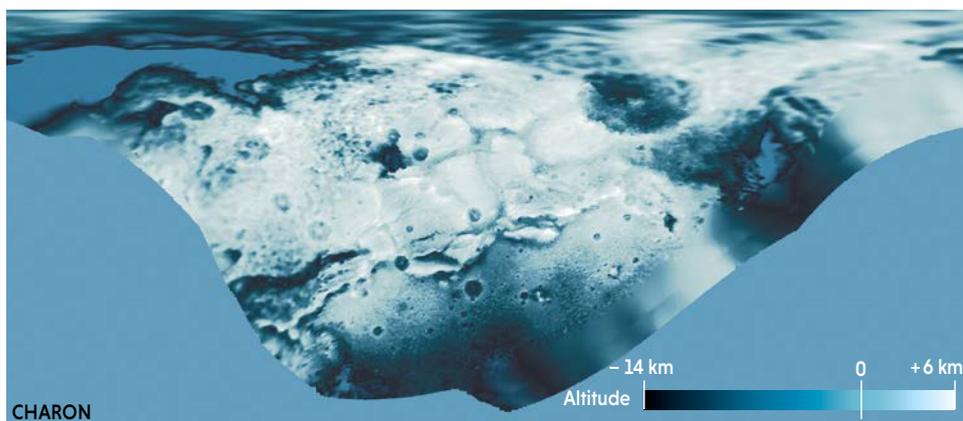
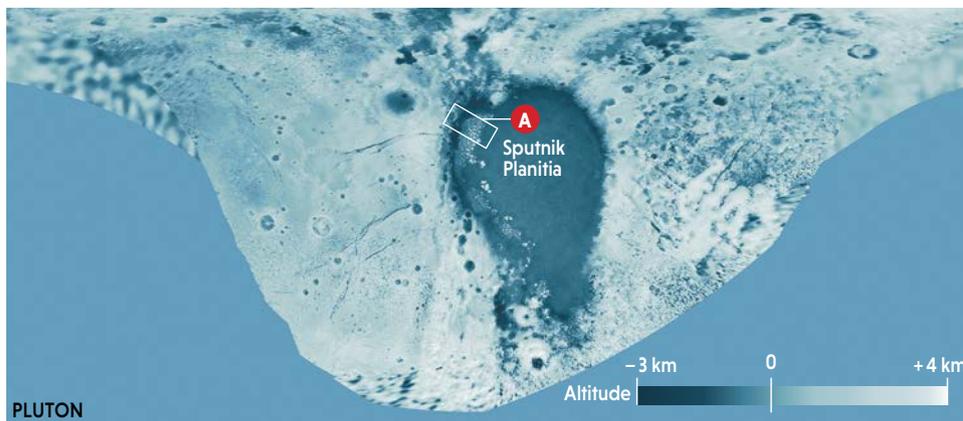


- 1 REX**  
L'instrument *Radio Science eXperiment* réutilise les équipements de communication radio de la sonde pour mesurer la température et la pression de l'atmosphère de Pluton.
- 2 PEPSSI**  
*Pluto Energetic Particle Spectrometer Science Investigation* analyse la densité et la composition des ions du plasma provenant de l'atmosphère de Pluton.
- 3 SWAP**  
*Solar Wind Around Pluto* (« vent solaire autour de Pluton ») mesure la vitesse à laquelle l'atmosphère de Pluton s'échappe et observe ses interactions avec le vent solaire.
- 4 LORRI**  
*Long Range Reconnaissance Imager* (« imageur de reconnaissance à longue portée ») est un appareil photo doté d'un puissant téléobjectif. Grâce aux données qu'il a recueillies, les chercheurs ont cartographié Pluton et étudié sa géologie.
- 5 SDC**  
L'instrument *Student Dust Counter*, construit et exploité par des étudiants, analyse la poussière spatiale que rencontre *New Horizons* lors de sa traversée du Système solaire.
- 6 RALPH**  
Cette caméra et spectromètre mesure les longueurs d'onde de la lumière visible et infrarouge qu'elle capte afin de dresser des cartes de couleur, de composition et de température de la surface de Pluton.
- 7 ALICE**  
*Alice* effectue des mesures spectroscopiques de la lumière ultraviolette afin d'étudier la composition de l'atmosphère de Pluton et de rechercher des atmosphères autour de la lune Charon et des objets de la ceinture de Kuiper.

> *New Horizons* embarquait tout ce qui était nécessaire pour en apprendre le plus possible au cours d'un survol bref : une caméra en noir et blanc, une caméra en couleurs, deux spectromètres (appareils qui analysent le spectre lumineux pour cartographier l'atmosphère et la surface plutioniennes), un compteur de particules pour dénombrer les poussières heurtant la sonde, et enfin deux détecteurs de plasma spatial pour mesurer la vitesse à laquelle les gaz s'échappent de l'atmosphère plutionienne et pour déterminer lesquels. En plus de cela, l'équipement radio de bord avait été doté d'un dispositif permettant de mesurer la température au sol et d'établir le profil de la pression et de la température atmosphériques en fonction de l'altitude.

Cette batterie d'instruments conférait à *New Horizons* une capacité scientifique jamais atteinte au cours d'un premier survol planétaire. Cela s'explique pour l'essentiel par les performances des technologies des années 2000, qui surclassent de loin celles des systèmes embarqués sur les sondes des années 1960 et 1970. Par exemple, alors que le spectromètre de *Voyager 1* qui cartographiait la composition de surface n'avait que un pixel, celui de *New Horizons* en avait 64 000. Avec une telle amélioration des performances des instruments scientifiques de bord et avec une capacité de la mémoire embarquée plus de 100 fois supérieure à celles des bandes magnétiques des sondes *Voyager*, *New Horizons* était forcément considérablement

Ces cartes incomplètes (pour des raisons techniques) de Pluton et de Charon montrent la diversité des terrains que l'on y trouve. Les zones sombres, comme la plaine de glace Sputnik Planitia sur Pluton, présentent des altitudes plus faibles, et les zones claires correspondent à des structures à fort relief. Le cliché du haut montre une bande large de 80 kilomètres de Pluton présentant des collines (à gauche), des montagnes accidentées (au centre) et le bord du glacier de la plaine Sputnik Planitia (à droite).



*New Horizons* a pu observer le terrain sous deux angles différents. Le décalage constaté entre les deux vues d'un même point permet d'estimer l'altitude de ce point. C'est une « parallaxe » analogue que mesurent nos yeux, et qui nous permet d'estimer la proximité d'un objet.

plus efficace que les sondes des précédentes missions de survol planétaire.

Même si notre vaisseau a passé l'essentiel des neuf années et demie de son voyage vers Pluton en sommeil, la planification de son survol nous a occupés pendant la plus grande partie de ce temps. Pour réaliser nos objectifs, *New Horizons* devait arriver près de la planète à l'intérieur d'une fenêtre temporelle de seulement neuf minutes. Plus fort: elle devait aussi réussir à passer à l'intérieur d'une fenêtre spatiale mesurant seulement 50 kilomètres par 100. Cela peut sembler vaste, mais après un trajet de 5 milliards de kilomètres depuis la Terre, cela revient à placer en une fois une balle de golf dans l'un des trous d'un terrain de golf de New York en tirant depuis Los Angeles...

Nous avons aussi dû concevoir, tester et programmer toutes les activités auxquelles nous voulions que *New Horizons* se livre pendant les six mois de son survol, prévu entre la mi-janvier et la mi-juillet 2015: la recherche, pendant la phase d'approche, d'éventuels débris dangereux; quelque quatre cents observations pour étudier Pluton et ses cinq lunes par chacun de nos sept instruments scientifiques; la recherche d'éventuelles nouvelles lunes et anneaux; les observations nécessaires à la triangulation de la position de Pluton afin de bien viser la fenêtre d'entrée du survol; l'allumage des moteurs assurant cette trajectoire; et finalement la transmission de toutes les données enregistrées lors de l'approche.

Nous devons également planifier non pas un, mais trois survols de Pluton, chacun selon >

> une trajectoire différente, au cas où des débris dangereux nous obligeraient à dévier *New Horizons*. Nous avons aussi dû concevoir un logiciel de bord capable de gérer plus de 150 défaillances possibles de la sonde ou de ses instruments. Et il nous a fallu définir des procédures de contrôle des dizaines de dysfonctionnements potentiels trop complexes pour qu'ils puissent être pris en charge par le logiciel de la sonde.

## UNE NOUVELLE PLANÈTE

Avant son survol par *New Horizons*, Pluton était largement inconnue. Étant donné son orbite lointaine et sa petite taille, même le puissant télescope spatial *Hubble* parvenait à peine à en révéler le disque. Pour l'essentiel, nous croyions savoir que cette petite planète mesurait environ 2300 kilomètres de diamètre, qu'elle avait cinq lunes, une atmosphère ténue et une surface rougeâtre incorporant de la glace de méthane, d'azote et de monoxyde de carbone. On disposait d'indices montrant la présence d'une calotte polaire de glace ainsi que d'autres grandes taches de surface. Tout cela suggérait une planète plus intéressante et plus compliquée que la plupart des objets glacés du Système solaire externe.

En fait, *New Horizons* a révélé une planète bien plus complexe, bien plus diversifiée géologiquement et bien plus active que ne l'avaient anticipé les spécialistes.

Nous avons notamment découvert que l'atmosphère de Pluton a une épaisseur de plusieurs centaines de kilomètres et qu'elle comporte des dizaines de couches concentriques de brume, mais peu ou pas de nuages. Pour la première fois, *New Horizons* a pu mesurer la pression atmosphérique à la surface de la planète: 11 microbars seulement, ce qui est à peu près la pression du sommet de la mésosphère terrestre, à quelque 80 kilomètres au-dessus de nos têtes, à la lisière du milieu spatial.

Autre résultat, l'atmosphère de Pluton s'échappe 500 à 1000 fois moins vite qu'attendu. En cela, elle s'apparente davantage aux atmosphères martienne ou terrestre qu'à la nébulosité d'une comète, au contraire de ce que prédisaient les modèles antérieurs au survol. Nous avons aussi constaté avec surprise que les brumes confèrent à Pluton une teinte bleue, ce qui donne à son ciel une couleur rappelant celle du nôtre.

*New Horizons* a par ailleurs révélé que le diamètre de Pluton est de 2376 kilomètres; cela dépasse les estimations qui en avaient été faites. Ce nouveau diamètre fait de Pluton la plus grande des petites planètes de la ceinture de Kuiper. Il s'ensuit, sa masse étant déjà connue, qu'elle est moins dense qu'on ne le pensait. On attribuait à Pluton une fraction rocheuse de l'ordre de 70 %; il est désormais

clair que cette proportion est plutôt proche de 66 %. Pour la plus grande part, la masse non rocheuse de Pluton est de la glace d'eau, mais des glaces plus exotiques sont présentes en surface. Les modèles de l'intérieur de Pluton fondés sur sa taille, sa masse et sa forme suggèrent que la planète recèle une sorte d'océan interne, une couche d'eau située à des centaines de kilomètres de profondeur, là où règnent des températures et des pressions sous lesquelles l'eau est liquide.

Les planétologues débattaient depuis longtemps de la topographie de Pluton. Comportait-elle des reliefs? Était-elle tourmentée? La réponse dépendait de l'épaisseur de la couche supérieure de glace d'azote. Cette glace, qui constitue l'essentiel de la surface de Pluton, s'affaisse facilement sous son propre poids, en dépit de la faible gravité sur cette planète. Une couche épaisse de glace d'azote empêcherait donc la formation de hautes structures géologiques. Or à l'arrivée de *New Horizons* près de Pluton, certaines des toutes premières images en haute résolution faisaient déjà apparaître des montagnes atteignant 4500 mètres d'altitude. Cela suggère que la glace d'azote de la surface de Pluton ne constitue qu'un mince vernis au-dessus de ce que nous avons ultérieurement identifié comme étant une croûte de glace d'eau.

*New Horizons* nous a aussi révélé l'étonnante diversité géologique de Pluton. Sa surface présente de vastes glaciers, des systèmes de failles s'étendant sur des centaines de kilomètres, des terrains chaotiques et montagneux résultant du morcellement de gigantesques glaciers, des blocs de méthane en voie de récession, des calottes de neige de méthane sur certaines chaînes de montagnes, etc. Très curieux aussi sont les milliers de cratères qui constellent la planète. De 1 à 10 kilomètres de diamètre, on présume qu'ils sont nés de la sublimation de glace d'azote sur les plaines équatoriales de Pluton.

Le plus grand glacier de Pluton est une structure de glace d'azote nommée Sputnik Planitia en l'honneur de la première mission spatiale. Elle couvre plus de 800000 kilomètres carrés, soit davantage que la France, la Grande-Bretagne et l'Irlande réunies. On ne connaît aucune structure comparable ailleurs dans le Système solaire. La plaine est en outre active géologiquement, puisqu'elle est animée de flux de glace et que certains motifs à sa surface trahissent la présence d'une source de chaleur sous-jacente. Nous avons aussi constaté que sa surface est renouvelée par des glaciers et des avalanches dévalant des chaînes montagneuses qui la surplombent.

Les surprises géologiques de Pluton ne s'arrêtent pas là. En comptant les cratères, nous pouvons estimer l'ancienneté du terrain,



Charon, la plus grosse des lunes de Pluton, présente des canyons très profonds et de vastes plaines glacées.



Lors du survol de Pluton par *New Horizons*, la foule présente au Laboratoire de physique appliquée de l'université Johns-Hopkins était en liesse.

car plus une surface planétaire est jeune, moins elle est constellée de cratères. Ce dénombrement nous a révélé des surfaces d'âges très variés, qui vont de sols très cratérisés vieux de plus de 4 milliards d'années, à des zones d'âge moyen variant entre 100 millions et 1 milliard d'années, en passant finalement par la plaine Spoutnik, dépourvue de cratère identifiable et qui date de moins de 30 millions d'années, voire encore bien moins. Un tel éventail d'âges était inattendu: en raison de la petite taille de Pluton, les chercheurs pensaient que cette planète s'était refroidie tôt dans son histoire. Or en se refroidissant, elle aurait dû perdre sa capacité à former de nouvelles couches en surface. Ce qui était admis s'est donc révélé faux: même si nous ignorons quelles sont les sources d'énergie à l'œuvre, Pluton est géologiquement active.

Autre surprise: nos géologues ont découvert sur Pluton des tours de glace de méthane de plus de 300 mètres de haut, qui forment un système organisé de centaines de kilomètres de long. Comme si tout cela ne suffisait pas pour une seule modeste planète, nous avons observé ce qui ressemble à de grands volcans de glace. Leurs âges, 100 à 300 mil-

## Autre surprise : des tours de glace de méthane de plus de 300 mètres de haut.

lions d'années, suggèrent qu'ils auraient été actifs dans un passé récent. Certains membres de notre équipe, dont je suis, ont aussi vu en certains endroits des indices de l'existence de réseaux de canaux de drainage et d'un lac gelé, qui subsisteraient depuis des époques reculées au cours desquelles la pression atmosphérique était assez élevée (plus que sur Mars aujourd'hui sans doute) pour que des fluides s'écoulaient et forment même des étendues liquides en surface.

Pour le dire simplement, les caractéristiques de l'atmosphère et de la surface de Pluton ont abasourdi les planétologues. Elles illustrent le fait que les petites planètes peuvent rivaliser en complexité avec la Terre ou avec Mars.

Comme Pluton elle-même, ses cinq lunes étaient largement inconnues avant la mission *New Horizons*. Le plus gros de ces objets est Charon, dont le diamètre est d'exactement la moitié de celui de Pluton. Cette grosse lune fut découverte en 1978 par les planétologues Jim Christy et Robert Harrington à l'aide de télescopes au sol. Avant *New Horizons*, on savait qu'elle était recouverte de glace d'eau inerte, qu'elle avait peu, voire pas d'atmosphère et qu'elle était bien moins colorée et réfléchissante que Pluton. Les quatre petites autres lunes – Styx, Nix, Kerberos et Hydra – ont toutes été découvertes entre 2005 et 2012 à l'aide du télescope spatial *Hubble* par des membres notre équipe. Les chercheurs savaient peu de chose de ces lunes à part leurs propriétés orbitales et leurs couleurs assez neutres, comme celle de Charon. Même leurs tailles n'étaient que grossièrement estimées. Aucune image précise n'en avait été obtenue à l'aide d'un télescope: il ne s'agissait que de simples points lumineux en orbite autour de Pluton.

### CHARON ET LES AUTRES LUNES

*New Horizons* nous a permis de dresser des cartes détaillées de la géologie, de la couleur, de la composition et du relief de Charon, d'y rechercher avec une bien meilleure sensibilité une atmosphère, de mesurer sa réflectivité dans l'ultraviolet et de préciser sa taille et sa forme. La sonde n'a pas été en mesure de s'approcher autant des quatre autres lunes que de Charon. Les informations recueillies à propos de ces petits satellites sont donc moins détaillées. Toutefois, la sonde a pu révéler leurs tailles, leurs périodes de rotation et leurs formes. *New Horizons* a aussi établi de grossières cartes en noir et blanc de chacune d'entre elles. Dans le cas de Nix et d'Hydra, elle a aussi produit des cartes en couleur de la surface, mesuré sa composition et estimé son âge.

Grâce à toutes ces découvertes, nous avons désormais une description de Charon qui rivalise avec celles des grands satellites glacés des planètes géantes recueillies par les missions *Voyager*, *Galileo* et *Cassini*. Charon n'a ni atmosphère ni composés volatils à sa surface, bien que nous ayons trouvé d'exotiques affleurements de glace d'ammonium et d'ammoniac. D'après le décompte des cratères, sa surface semble avoir plus de 4 milliards d'années. Peu de variations d'âge y sont perceptibles, ce qui signifie que son moteur géologique a dû fonctionner très peu de temps. Toutefois, pendant ce court laps de temps, Charon a créé dans son hémisphère sud de vastes plaines inondées de glace, une large ceinture de canyons jusqu'à 5 fois plus profonds que le Grand Canyon du Colorado, >

> des montagnes et une sorte de calotte polaire rouge qui ne ressemble à aucune autre structure du Système solaire. Ce pôle rouge semble constitué de méthane et d'azote qui se seraient échappés de l'atmosphère de Pluton au fil du temps et se seraient redéposés aux pôles froids de Charon, où le rayonnement ultraviolet les aurait transformés en sous-produits d'hydrocarbures de couleur rouge. La ceinture de canyons de Charon semble être le résultat de contraintes mécaniques titanesques engendrées par la congélation et la dilatation de l'eau interne à la lune au cours du refroidissement qui a suivi sa formation.

Nous avons constaté que les quatre petits satellites plutoniens sont tous à peu près aussi réfléchissants que Pluton lui-même, qui est environ 2 fois plus réfléchissant que Charon; ce fait, alors que leur surface semble constituée du même matériau que Charon, est énigmatique. Aucun n'est assez gros pour garder une atmosphère. Des cratères sont présents à leurs surfaces. Il est probable que la matière éjectée lors de la formation de ces cratères ait donné naissance à des anneaux autour de Pluton, même si aucun n'est observable aujourd'hui autour de la planète.

Les orbites de Nix et d'Hydra suggèrent qu'elles se sont formées à la suite de l'impact massif sur Pluton qui a créé Charon. Nos cartes de ces lunes ont une résolution suffisante pour repérer toute une variété de cratères. La datation qu'ils rendent possible montre que leurs surfaces ont 4 milliards d'années environ, soit l'âge de Charon. Ce résultat prouve que l'impact qui a formé ces satellites s'est produit très tôt dans l'histoire du Système solaire et ne peut être à l'origine de l'énergie qui alimente l'activité géologique de Pluton aujourd'hui.

Nous avons aussi appris que les périodes de rotation sur elles-mêmes des quatre petites lunes de Pluton sont rapides comparées à leurs périodes de révolution. Une observation surprenante, qui montre qu'aucune de ces lunes n'a synchronisé sa rotation avec son orbite autour de Pluton. En d'autres termes, on n'observe pas dans leur cas le verrouillage gravitationnel entre rotation et révolution si répandu parmi les satellites des planètes géantes. Quelque chose affecte leurs rotations. Les tiraillements gravitationnels dus au système Pluton-Charon?

Bien que *New Horizons* ait désormais transmis toutes les données issues de son survol du système plutonien, nous sommes très loin de les avoir exploitées toutes. Des années de travail attendent notre équipe scientifique et d'autres. Elles devraient nous apporter encore de nombreuses découvertes sur la surface, l'intérieur, l'origine, l'atmosphère de Pluton ainsi que sur ses lunes.

L'exploration du système plutonien par *New Horizons* étant achevée, la mission de cette sonde se poursuit ailleurs. En 2016, la Nasa a approuvé une prolongation qui devrait nous emmener jusqu'à la mi-2021. Pendant ces cinq ans, *New Horizons* explorera la ceinture de Kuiper, ce vaste anneau de petits corps et de petites planètes en orbite autour du Soleil, très loin au-delà de Neptune. Le temps fort de cette exploration sera un survol rapproché du corps KBO 2014 MU<sub>69</sub> (noté ainsi d'après l'anglais *Kuiper belt object*) prévu pour le 1<sup>er</sup> janvier 2019.

## SERRER DE PRÈS LA CEINTURE DE KUIPER

Ce très vieux caillou rougeâtre, préservé depuis plus de 4 milliards d'années par une congélation cosmique très loin du Soleil, sera le vestige de la formation du Système solaire le plus intact jamais étudié. Il ne mesure qu'une trentaine de kilomètres de diamètre, mais pourrait avoir ses propres lunes. On pense qu'il s'agit d'un représentant typique des matériaux à partir desquels Pluton et les nombreux petits corps de la ceinture de Kuiper se sont formés.

*New Horizons* rencontrera MU<sub>69</sub> quand sa distance au Soleil sera environ 44 fois la distance Terre-Soleil. Au cours du survol, la sonde mettra en œuvre toute sa panoplie d'instruments pour étudier la composition et



# En plus du survol rapproché de MU<sub>69</sub>, *New Horizons* étudiera de près une vingtaine d'autres corps



la géologie de l'objet. Elle cherchera des signes d'activité et des traces d'atmosphère, des lunes et des anneaux, et mesurera sa température. Entre 2019 et 2021, en plus du survol rapproché de MU<sub>69</sub>, *New Horizons* étudiera de près au moins une vingtaine d'autres corps de la ceinture de Kuiper. Ces observations nous aideront à interpréter les données recueillies sur MU<sub>69</sub>. Nous rechercherons aussi des

## BIBLIOGRAPHIE

A. Stern et D. Grinspoon, **Chasing New Horizons : Inside the Epic First Mission to Pluto**, Picador, 2018.

S. A. Stern et al., **The Pluto system : Initial results from its exploration by New Horizons**, *Science*, vol. 350, article aad1815, 2015.

F. Forget, **Pluton : le ciel et les glaces**, *Dossier Pour la Science* n° 90, janvier-mars 2016.

A. Stern, **Voyage à l'orée de la nuit**, *Pour la Science* n° 296, juin 2002.

satellites de ces objets et étudierons leurs propriétés de surface et leurs formes.

Quand elle aura atteint les confins de la ceinture de Kuiper, *New Horizons* en étudiera aussi l'environnement spatial, notamment l'hélium gazeux, le vent solaire et les particules chargées parvenant dans cette région si éloignée de la sphère d'influence du Soleil. Nous étudierons également la densité de poussière dans la ceinture de Kuiper jusqu'à une distance égale à au moins 50 fois la distance Terre-Soleil, juste au-delà des parties les plus reculées de l'orbite elliptique de Pluton.

## NOUVEAUX HORIZONS POUR NEW HORIZONS

Nous espérons aussi que la Nasa décidera de prolonger la mission *New Horizons* au-delà de 2021. La sonde est toujours en bon état de fonctionnement et ses sources d'énergie devraient suffire jusqu'au milieu des années 2030, voire plus. Pendant cette période, *New Horizons* explorera de nombreux autres objets de la ceinture de Kuiper et pourrait même effectuer le survol rapproché de l'un d'eux.

Après une période de développement un peu chahutée et une longue traversée du Système solaire, *New Horizons* a achevé sa

reconnaissance de la dernière des planètes connues à l'aube de l'ère spatiale. Elle deviendra la première sonde à explorer de petits objets de la ceinture de Kuiper.

Pendant les quinze années de planification de la mission et de vol, j'ai mis au défi notre équipe scientifique d'utiliser toutes les connaissances engrangées lors des missions d'exploration des autres planètes pour prédire ce que nous découvririons sur Pluton. La nature nous a surpris, révélant une planète beaucoup plus diverse et active que tout ce à quoi nous nous attendions.

En fait, Pluton est à tel point plus complexe et plus dynamique qu'attendu, que beaucoup de chercheurs, au sein de notre équipe et ailleurs, souhaiteraient mettre bientôt une autre sonde en orbite dans le système plutonien afin d'étudier plus avant Pluton et ses lunes. Nous aimerions aussi que de nouvelles missions de reconnaissance par survol du type de *New Horizons* explorent d'autres objets de la ceinture de Kuiper afin d'étudier leur diversité, exactement comme des sondes l'ont fait pour les planètes internes et les planètes géantes. Nous espérons que le succès retentissant de notre mission ne marquera pas la fin, mais plutôt le début de l'exploration des planètes et des petits objets lointains. ■



A FOND LES SCIENCES ET LES TECHNIQUES !

L'Odyssee Céleste est une association scientifique qui anime tout au long de l'année un Club scientifique, des stages scientifiques et techniques (à partir de 7ans) durant les vacances scolaires et un cycle de conférences. Equipée d'un planétarium itinérant pour des diffusions de spectacles vers le grand public, plusieurs programmes sont à votre disposition pour vous emmener à la découverte du ciel nocturne et de l'espace lointain.

Les inscriptions sont ouvertes pour les stages des vacances de Noël à partir du 26 décembre 2017 et le club scientifique du 8 janvier 2018 :



1) **LEGO MINDSTORM EV3** : avec de l'ingéniosité, de l'imagination et quelques notions d'électronique, les jeunes concevront un robot télécommandé qui avance, tourne, recule.

2) **PILOTER UN MINI DRONE** : il suscite un réel intérêt en France et dans le monde, plus petit que l'avion et pouvant se déplacer, se rendre dans des lieux très étroits.

3) **OBSERVER LE CIEL ET LES ÉTOILES** : ce stage propose un accompagnement dans la découverte d'instruments d'astronomie : Lunette/Télescope et paires de jumelles.

4) **PRENEZ VOTRE ENVOL AVEC LE SIMULATEUR DE VOL** : vivez pleinement la collaboration entre le pilote d'un avion et l'instructeur de vol. Un vrai travail d'équipe !



Toutes nos thématiques s'intègrent pleinement dans ceux des instructions officielles de l'Éducation Nationale et des projets éducatifs des lieux d'accueils.

Inscrivez-vous sur : [www.odyssee-celeste.com](http://www.odyssee-celeste.com), [rp@odyssee-celeste.com](mailto:rp@odyssee-celeste.com)

Association Odyssee Céleste, 20 RUE LAVOISIER, 95300 Pontoise

Siret : 79945246100012 APE : 9499Z

## L'ESSENTIEL

> *Physarum polycephalum*, ou blob, n'est ni un animal, ni une plante, ni un champignon.

> Cet organisme unicellulaire est surprenant par de nombreux aspects : il présente une diversité de 720 sexes, il peut se déplacer de quelques centimètres par heure, il est facile à cloner...

> Bien que dépourvu de neurones, il est capable d'apprendre, par habitude, à traverser un pont couvert de substance répulsive afin d'atteindre de la nourriture.

> Plus étonnant, un blob peut transmettre à un autre blob sa capacité à traverser de tels ponts.

## LES AUTEURS



AUDREY DUSSUTOUR  
chargée de recherche CNRS  
au Centre de recherche  
sur la cognition animale,  
à Toulouse



DAVID VOGEL  
postdoctorant à l'École  
d'agriculture, d'alimentation  
et de vin de l'université  
d'Adelaïde, en Australie

# Le blob, cellule géante... et intelligente!

ÉTONNANT ORGANISME MACROSCOPIQUE CONSTITUÉ D'UNE SEULE CELLULE, LE BLOB PEUT APPRENDRE ET MÊME TRANSMETTRE SON SAVOIR. IL EST CAPABLE DE TROUVER LE PLUS COURT CHEMIN POUR SORTIR D'UN LABYRINTHE OU D'IMITER LE RÉSEAU FERROVIAIRE JAPONAIS.

**L**a diversité des formes de vie sur Terre dépasse l'imagination et ne cesse de nous surprendre. Dans ce foisonnement du vivant, les organismes multicellulaires sont les plus connus, aussi bien d'un point de vue physiologique que comportemental. Ainsi, nous connaissons tous les capacités d'orientation des pigeons, de photosynthèse des plantes, d'apprentissage des chiens ou encore de construction des fourmis. À l'inverse, les capacités des organismes unicellulaires, souvent qualifiées de simples, sont plutôt méconnues.

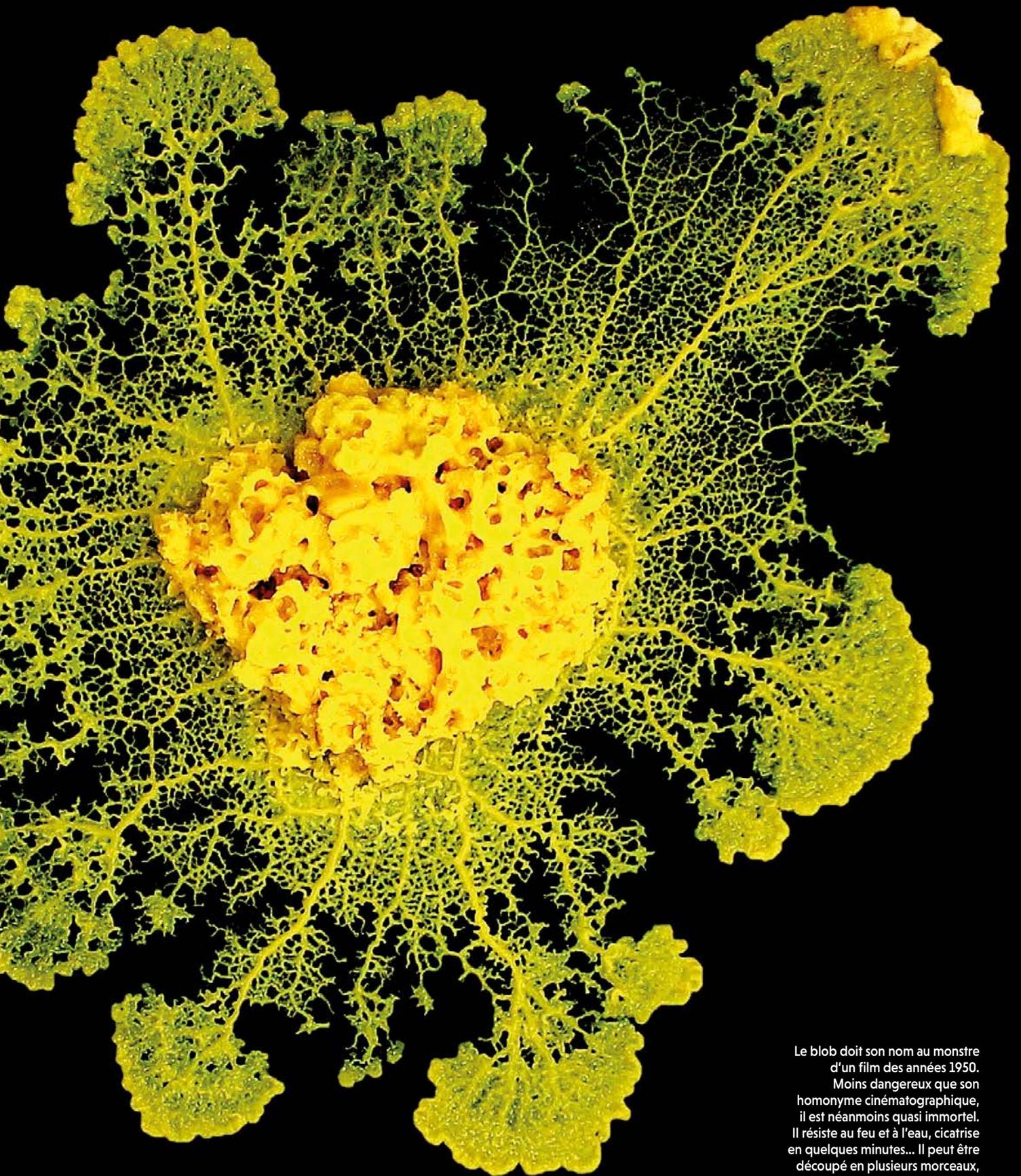
Pourtant, les organismes unicellulaires présentent des comportements qui n'ont rien à envier à ceux observés chez les autres organismes : certains sont capables de communiquer, de s'orienter, de coopérer, de construire des abris... Un exemple étonnant est celui des capacités d'apprentissage que nous avons

découvertes récemment chez un organisme unicellulaire de forme et de taille indéfinies, visqueux et de couleur jaune vif : le myxomycète *Physarum polycephalum*.

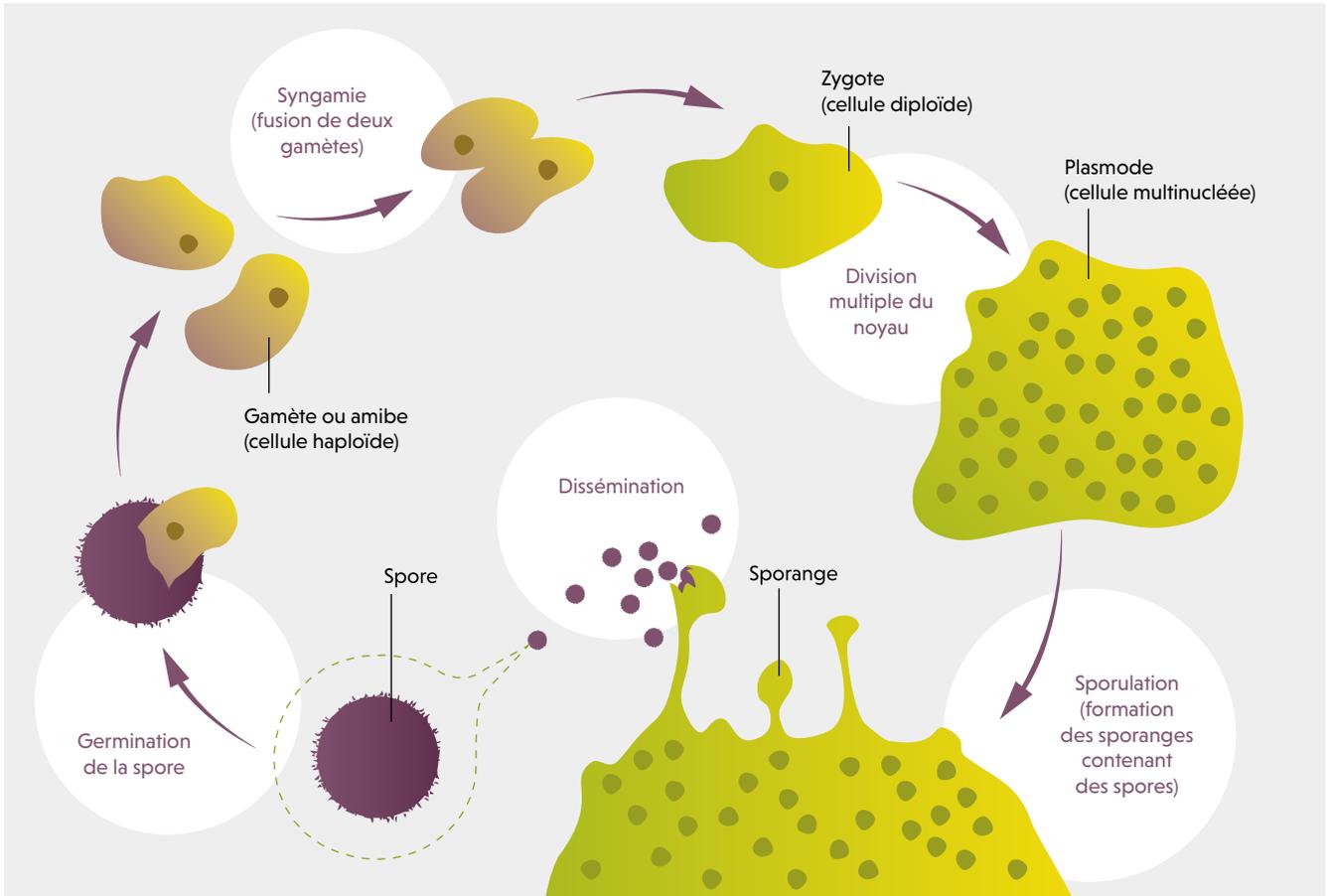
## UN ORGANISME INCLASSABLE

La place de *Physarum polycephalum* dans l'arbre du vivant a longtemps été incertaine. Pour classer un organisme, on commence par spécifier le règne (animal, végétal, etc.) auquel il appartient. Mais qu'en est-il de *Physarum polycephalum*, qui a des affinités tant avec le règne végétal qu'avec le règne animal et celui des champignons ? En 1753, le naturaliste suédois Carl von Linné a classé les myxomycètes parmi les plantes, en s'appuyant sur leur façon de produire des pigments et sur la diversité de ces pigments – diversité qui rappelle celle des plantes, puisqu'on trouve des myxomycètes (plus d'un millier d'espèces connues aujourd'hui) de toutes les couleurs. >





Le blob doit son nom au monstre d'un film des années 1950. Moins dangereux que son homonyme cinématographique, il est néanmoins quasi immortel. Il résiste au feu et à l'eau, cicatrise en quelques minutes... Il peut être découpé en plusieurs morceaux, chacun devenant un nouveau blob.



> Néanmoins, en 1833, le botaniste allemand Heinrich Link a classé *Physarum polycephalum* dans le règne des champignons, en raison de son mode de reproduction, proche de celui de ces organismes. En effet, la vie du myxomycète débute par la fusion de deux gamètes (aussi nommés amibes), qui sont des cellules haploïdes ne contenant qu'un exemplaire de chaque chromosome (voir la figure ci-dessus). La fusion n'a lieu que si les amibes sont de types sexuels différents, ce qui a de grandes chances de se produire puisqu'il existe 720 types sexuels chez *Physarum polycephalum* ! La cellule née de cette fusion croît, mais sans se diviser. Seul son noyau se divise et donne deux noyaux, qui se divisent à leur tour et ainsi de suite. La cellule peut alors atteindre des tailles record, de l'ordre de plusieurs mètres carrés, tout en hébergeant des milliards de noyaux. À titre de comparaison, une cellule humaine ne mesure en moyenne que 10 micromètres de diamètre...

Cette cellule géante multinucléée est nommée plasmode, mais nous l'avons surnommée « blob » à cause de son aspect. Le blob est habituellement de couleur jaune et vit dans des zones tempérées, humides et sombres telles que les sous-bois. Quand la nourriture commence à manquer, le blob enclenche la sporulation et forme des milliers d'organes nommés sporanges. Ce sont des sortes de boules (de 0,5 millimètre

de diamètre environ) reposant sur un pied très fin. Ces boules iridescentes renferment des spores, comme les champignons, qui seront disséminées par le vent, l'eau et les animaux, et qui se transformeront en amibes haploïdes une fois arrivées dans un milieu propice.

Cependant, parce que le blob se déplace pour se nourrir, un mode d'alimentation qui évoque celui des animaux, le chirurgien, botaniste et microbiologiste allemand Anton de Bary l'a classé en 1859 dans le règne animal. Cet organisme est capable de se déplacer à une vitesse de quelques centimètres par heure pour se nourrir de spores, de bactéries et de champignons. Dépourvu de bouche, il engouffre sa nourriture par phagocytose. De nombreuses voix s'étant élevées contre la proposition de Bary, le blob ne restera classé parmi les animaux que brièvement et se retrouvera confiné parmi les champignons jusque dans les années 1970.

## APPARENTÉ AUX AMIBES

Le génome de *Physarum polycephalum* a fini d'être séquencé en décembre 2015. À la suite de ces travaux, le blob a été classé dans le règne des amibozoaires, qui englobe tous les myxomycètes. Les amibozoaires sont des organismes unicellulaires qui produisent des pseudopodes (prolongements temporaires de la cellule) et changent de forme à mesure qu'ils

**Le cycle de vie du blob.** Sa reproduction via des spores n'est pas sans rappeler celle des champignons. C'est ce qui a conduit les biologistes du XIX<sup>e</sup> siècle à classer le blob parmi ces organismes, à tort.

se déplacent. Mais comment se déplace le blob? Ce dernier est parcouru d'un réseau de veines où circule le protoplasme, un liquide riche en nutriments et autres molécules essentielles à la vie de l'organisme. Le blob se déplace grâce à ce réseau. Le courant dans les veines s'inverse toutes les deux minutes. Or cette alternance d'une direction à l'autre n'est pas strictement symétrique: le débit est plus élevé dans la direction de déplacement choisie. Sous la pression du courant qui s'exerce sur la membrane, l'organisme tout entier avance.

## UN BON ÈLÈVE

Si le blob a déjà prouvé son caractère singulier, il n'a pourtant pas fini de surprendre. Parmi ses étonnantes capacités, citons celle de trouver le chemin le plus court dans un labyrinthe ou celle de dessiner des réseaux optimisés (voir l'encadré page 57). En 2016, avec Romain Boisseau, nous avons montré que le blob était capable d'apprendre mais aussi de transmettre un comportement appris à un autre blob. Jusque-là, de telles capacités n'avaient été observées ni chez *Physarum polycephalum* ni chez aucun autre organisme unicellulaire.

Dans notre expérience, les blobs ont été capables d'effectuer et de transmettre à un congénère un type particulier d'apprentissage: l'habituation. On définit celle-ci comme étant l'atténuation progressive d'une réaction comportementale à un stimulus inoffensif présenté de façon répétitive. L'exemple d'un chat retirant sa patte quand on la touche illustre cette notion. Le stimulus inoffensif qui consiste à toucher la patte d'un chat provoque une réponse comportementale, le retrait de la patte. Mais la répétition de cette action dans un laps de temps assez court fait que le chat retire de moins en moins sa patte. La baisse de la réponse comportementale peut aller jusqu'à, dans certains cas, ne plus du tout bouger la patte.

Deux critères supplémentaires doivent être remplis pour que le comportement observé soit considéré comme une habituation. Il faut que la réponse comportementale soit spécifique au stimulus et qu'on retrouve l'état initial si le stimulus n'est pas présenté durant un certain temps. Si nous reprenons l'exemple du chat, cela signifie que toute stimulation autre que le toucher de la patte, telle que verser de l'eau dessus, doit provoquer le retrait de la patte et cette réaction doit réapparaître si la patte n'est pas touchée pendant un certain temps.

Pour étudier l'habituation chez un organisme unicellulaire, il faut d'abord trouver une stimulation inoffensive provoquant une réponse comportementale mesurable. Or le blob est chimiotactique, c'est-à-dire qu'il dirige ses mouvements en fonction des molécules présentes dans son environnement. Ainsi, quand des blobs sont en présence d'une molécule répulsive, ils

vont soit se déplacer dans la direction inverse, soit, s'ils ne peuvent pas l'éviter, croître lentement et de façon à être le moins possible en contact avec cette substance. À l'inverse, s'ils sont en présence d'une molécule neutre ou attractive, ces derniers ont tendance à croître plus rapidement et à s'étaler dans leur environnement. L'utilisation du caractère chimiotactique des blobs remplissait donc tous les critères permettant d'étudier l'habituation chez *Physarum polycephalum*.

Ce comportement a été mis en évidence en forçant, à plusieurs reprises, des blobs à traverser un pont contenant une concentration précise d'une molécule répulsive, par exemple du sel, pour atteindre une source de nourriture (voir la photo page 56). À chaque traversée de pont, nous notions la vitesse de déplacement et la forme du blob pour voir si au fil des répétitions ces deux paramètres changeaient. Par ailleurs, nous avons utilisé différentes molécules pour voir si un blob habitué à une molécule n'était pas habitué à toutes les molécules, afin de garantir la spécificité du stimulus. Enfin, une période de repos était prévue après l'habituation afin de vérifier qu'il y avait bien un retour au comportement initial.

Les résultats de ces expériences ont été sans appel: les blobs étaient bien capables de s'habituer spécifiquement à une molécule. La première fois qu'ils devaient traverser le pont, les blobs mettaient beaucoup de temps et n'étaient que très peu en contact avec le pont. Mais ensuite, les blobs mettaient de moins en moins de temps et s'étaient de plus en plus sur le pont, ce qui prouvait leur habituation à la molécule. De plus, les blobs ayant été habitués au sel n'étaient en aucun cas habitués à d'autres molécules et retrouvaient, après une phase de repos, un comportement similaire à celui de la première traversée.

Le blob se développe dans des zones humides. On le rencontre ainsi souvent dans les sous-bois, où il se nourrit principalement de champignons. En laboratoire, les chercheurs lui donnent à manger des flocons d'avoine, qu'il dévore goulûment.





Dans les expériences des auteurs, les blobs (*en haut, en jaune*) sont séparés de leur nourriture (*en bas, en blanc*) par des ponts couverts de sel. Les blobs apprennent à traverser ce chemin de plus en plus vite, malgré l'aversion vis-à-vis du sel, afin de s'alimenter.

> Les recherches sur l'habituation et les blobs ne se sont pas arrêtées à cette découverte.

Mais avant d'aller plus loin, soulignons deux caractéristiques supplémentaires des blobs. Un blob peut être découpé en de nombreux fragments qui agiront par la suite, après un petit temps de repos, comme autant de blobs autonomes. À l'inverse, de nombreux blobs présents dans un même environnement sont capables de se percevoir et de se rapprocher jusqu'à fusionner et ne former qu'un seul organisme.

Suite à ces différents résultats et observations, une question naturelle se posait : un blob habitué à une molécule pourrait-il transférer son habituation à un congénère naïf ? Pour y répondre, nous avons réalisé plusieurs expériences. Un blob habitué à du sel était autorisé à fusionner avec un blob n'ayant jamais rencontré le sel (un blob naïf) pour former un blob mixte. Des blobs contrôles résultaient de la fusion de deux blobs naïfs ou de deux blobs habitués. Les blobs issus de la fusion devaient ensuite traverser un pont couvert de sel. Or les blobs mixtes se sont montrés aussi rapides que les blobs habitués, et surtout bien plus rapides que les blobs naïfs.

Nous avons ensuite décidé de tester les blobs non plus par paires, mais par trios et quatuors, pour savoir si l'information se transmettait de blob à blob. Certains trios et quatuors étaient constitués uniquement d'habitués ou de naïfs, et d'autres incluaient un ou deux blobs habitués. Tous les blobs étaient placés côte à côte, sur une ligne, et on les laissait fusionner de proche en proche. Même résultat qu'avec les paires de blobs mixtes : quel que soit le nombre de blobs naïfs, il suffisait qu'un seul blob du groupe soit expérimenté pour que l'information circule.

Afin de vérifier que le transfert d'information avait vraiment lieu entre les deux blobs et que le blob habitué ne prenait pas simplement le dessus sur le blob naïf, nous avons répété l'expérience, mais en séparant les deux blobs après quelques heures de fusion. On les testait alors individuellement, afin de voir si le blob initialement naïf mettait autant de temps à traverser le pont contenant le sel que le blob habitué. L'expérience a montré que les blobs initialement naïfs et les blobs habitués traversaient le pont à la même vitesse si et seulement si la fusion avait duré au moins trois heures. En observant les blobs de plus près, au microscope, nous avons remarqué qu'une veine se formait entre les blobs au bout de trois heures de fusion (*voir la photo ci-dessous*). L'information que le blob échange avec son congénère circulerait donc dans ses veines.

## LE MODE DE TRANSMISSION DE L'HABITUATION EST ENCORE MYSTÉRIEUX

Les mécanismes précis permettant à un blob de s'habituer à une substance et à transférer cette habitude nous sont encore inconnus. Plusieurs hypothèses permettent cependant d'expliquer ces résultats. La première implique les récepteurs extramembranaires sensibles à diverses molécules. Selon ce scénario, la présentation répétée d'une molécule induirait une modification temporaire de la structure des récepteurs, qui augmenterait leur seuil d'activation. Cet effet rendrait alors les blobs moins sensibles à la molécule et ils présenteraient donc une réaction d'aversion diminuée. Mais cette théorie semble difficile à concilier avec le transfert de l'habituation, le transfert de récepteurs entre le blob habitué et le naïf étant peu probable.

La deuxième hypothèse invoque une modification épigénétique de l'ADN (une modification épigénétique correspond à une modulation locale de l'expression de certains gènes). Ainsi, une modification épigénétique de gènes produisant des protéines impliquées dans la régulation

Lorsque deux blobs entrent en contact, leurs membranes fusionnent et l'on voit une veine relier les deux organismes. C'est probablement par ce canal que l'apprentissage d'un blob est transmis à l'autre.



## LE LABYRINTHE ET LES RÉSEAUX DE TOSHIYUKI NAKAGAKI

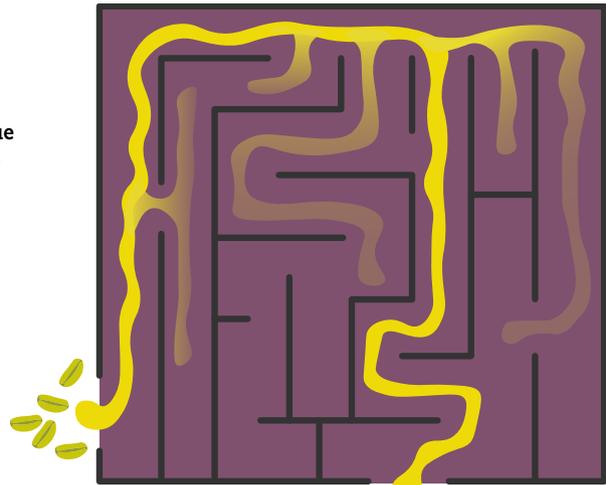
**E**n 2000, Toshiyuki Nakagaki, de l'université d'Hokkaido, a décroché son premier prix Ig Nobel (une parodie de prix Nobel récompensant des travaux de recherche insolites) en montrant que le blob pouvait trouver le plus court chemin pour sortir d'un labyrinthe. Il a obtenu un second prix Ig Nobel en démontrant que le blob pouvait planifier des réseaux, ferroviaires ou autres, mieux que les humains !

### Le labyrinthe

Dans cette expérience, des bords placés dans un labyrinthe devaient repérer deux sources de nourriture situées chacune à une sortie du labyrinthe. Les bords se sont tout d'abord étalés et ont fusionné de façon à former un seul blob qui a rempli à lui seul le labyrinthe. Les deux points de nourriture étant alors localisés, le blob a abandonné les chemins inutiles de façon à n'emprunter que la route la plus courte reliant les deux sorties.

### Le réseau ferroviaire de Tokyo

Ici, Toshiyuki Nakagaki a recréé dans une boîte une minicarte de la région de Tokyo et a déposé un flocon d'avoine à l'emplacement de chaque ville de la région. Il a ensuite placé un blob à l'emplacement de Tokyo et l'a laissé explorer son environnement. À chaque fois que le blob rencontrait un flocon d'avoine, il déployait une veine entre sa position initiale et le flocon. Ainsi, à la fin de l'expérience, le blob avait formé un réseau plus efficace et plus robuste que le réseau ferroviaire existant. Dans le réseau du blob, toutes les villes restaient connectées même si un lien était rompu, et les chemins empruntés apparaissaient à la fois plus courts et moins redondants.



Flocons d'avoine



de la réception des molécules induirait une baisse de sensibilité vis-à-vis de cette molécule. La fusion de deux bords permettrait d'échanger ces protéines, et c'est ainsi qu'un blob naïf deviendrait moins sensible à une molécule aversive qu'il n'a jamais rencontrée.

Selon la troisième hypothèse, la plus parcimonieuse et la plus élégante, le blob incorporerait les répulsifs dans le cytoplasme circulant à l'intérieur du réseau de veines, qui agit comme une forme de mémoire. Par exemple, le cytoplasme s'enrichirait en sel à force de traverser des ponts salés; par conséquent, le blob ne serait plus gêné par le sel, puisque la différence de concentration en sel entre l'extérieur et l'intérieur de la cellule serait faible.

De plus en plus d'études montrent que des organismes longtemps considérés comme simples sont finalement capables de nous étonner. L'utilisation du terme « apprentissage » pouvait sembler inappropriée pour décrire le comportement d'un organisme unicellulaire. Nous avons l'habitude d'utiliser ce terme pour des humains ou des animaux qui nous sont proches, voire pour des insectes, mais en aucun cas pour des organismes dépourvus de système nerveux. Pourtant, les comportements du blob sont en adéquation avec les définitions que l'on donne de l'apprentissage. D'un point de vue évolutif, ces résultats ne sont cependant pas

étonnants. L'évolution d'un comportement correspond à une modification très lente d'un caractère ayant initialement des fonctions ou des mécanismes potentiellement bien différents. Le type d'apprentissage observé chez le blob serait alors une forme primitive des modes d'apprentissage actuels des organismes dotés d'un système nerveux ou de tout autre mécanisme sous-tendant la même fonction, à savoir une adaptation optimale au milieu.

## UN MODÈLE BIOLOGIQUE

Bien sûr, l'utilisation d'un modèle biologique tel que *Physarum polycephalum* n'a pas la prétention de répondre à toutes les grandes questions de la biologie. Mais cet organisme offre un cadre assez simple pour comprendre plus finement l'articulation entre le fonctionnement intracellulaire (moléculaire et génétique) et l'expression d'un comportement. *Physarum polycephalum* n'étant qu'une cellule, toutes les modifications intracellulaires se répercutent en effet potentiellement sur le plan extracellulaire. Alors que pour des organismes constitués de nombreux niveaux biologiques différents (molécules, cellules, organes), il faut étudier tous ces niveaux ensemble pour comprendre comment ils interagissent et quels sont leurs impacts sur un comportement: une tâche bien plus complexe qu'avec le blob! ■

## BIBLIOGRAPHIE

A. Dussutour, **Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur le blob sans jamais oser le demander**, Éditions des Équateurs, 2017.

D. Vogel et A. Dussutour, **Direct transfer of learned behaviour via cell fusion in non-neural organisms**, *Proc. R. Soc. B*, en ligne, 21 décembre 2016.

R. P. Boisseau et al., **Habituation in non-neural organisms : Evidence from slime moulds**, *Proc. R. Soc. B*, en ligne, 27 avril 2016.

# Voir les fleurs comme une abeille

LES INSECTES SONT, CONTRAIREMENT AUX HUMAINS, SENSIBLES À L'ULTRAVIOLET. CETTE CAPACITÉ LEUR CONFÈRE UNE VISION DES FLEURS BIEN DIFFÉRENTE DE LA NÔTRE. DÉMONSTRATION AVEC DES PRISES DE VUE SOUS ÉCLAIRAGE ULTRAVIOLET.

Toutes les photographies sont des auteurs, Aline Raynal-Roques et Albert Rogueant



La fleur de passiflore (*Passiflora caerulea*)  
vue à la lumière ultraviolette.

## LES AUTEURS



**ALINE RAYNAL-ROQUES**  
botaniste et professeure  
honoraire du Muséum  
national d'histoire  
naturelle, à Paris



**ALBERT ROGUENANT**  
entomologiste  
et botaniste spécialiste  
des Broméliacées

**P**our se reproduire, la plupart des plantes doivent recevoir du pollen, provenant de préférence d'un autre individu. Ce transport est souvent assuré par des insectes, qui trouvent dans les fleurs de la nourriture sous forme de pollen ou de nectar.

Au fil de l'évolution, les plantes ont développé différents moyens (parfum, couleurs...) d'attirer et guider les insectes vers le pollen. Sur le plan visuel, le rayonnement ultraviolet, dont l'énergie représente 5% de la lumière du jour, tient une place essentielle: beaucoup d'insectes, notamment les Hyménoptères, dont font partie les abeilles, y sont sensibles, à la différence des humains.

Avec les trois pics de sensibilité de leurs yeux (jaune-vert, bleu et ultraviolet), les abeilles ont donc une perception des couleurs d'une fleur différente de la nôtre. Pour se faire néanmoins une idée approximative de la perception de l'insecte, une solution consiste à éclairer la fleur uniquement à la lumière ultraviolette. Les ultraviolets sont en partie absorbés par les structures et pigments des différents organes floraux; ce rayonnement incident est partiellement converti (par photoluminescence) en lumière visible réémise. L'observateur humain peut alors voir la fleur dans ses «nouvelles» couleurs et la photographier.

C'est ce que nous avons fait avec diverses espèces de plantes. Pour ce faire, nous utilisons un appareil photo numérique (un Nikon D700) avec, comme source de lumière ultraviolette, deux tubes fluocompacts (modèle Philips PL-S 9W/08/2P) qui émettent principalement des ultraviolets A, proches du spectre visible. La prise de vue s'effectue dans le noir complet.

Les résultats sont étonnants. Ils montrent que les couleurs florales vues sous éclairage ultraviolet sont parfois très différentes des couleurs vues en lumière du jour. Et que des fleurs distinctes mais de même couleur ont parfois, sous éclairage ultraviolet, des couleurs complètement différentes. Outre le plaisir esthétique qu'elles procurent, les photographies révèlent les repères et attracteurs visuels qui guident les insectes vers les organes floraux essentiels à la reproduction de la plante: des balises en quelque sorte, au rôle analogue à celles dont sont équipés les aéroports! ■

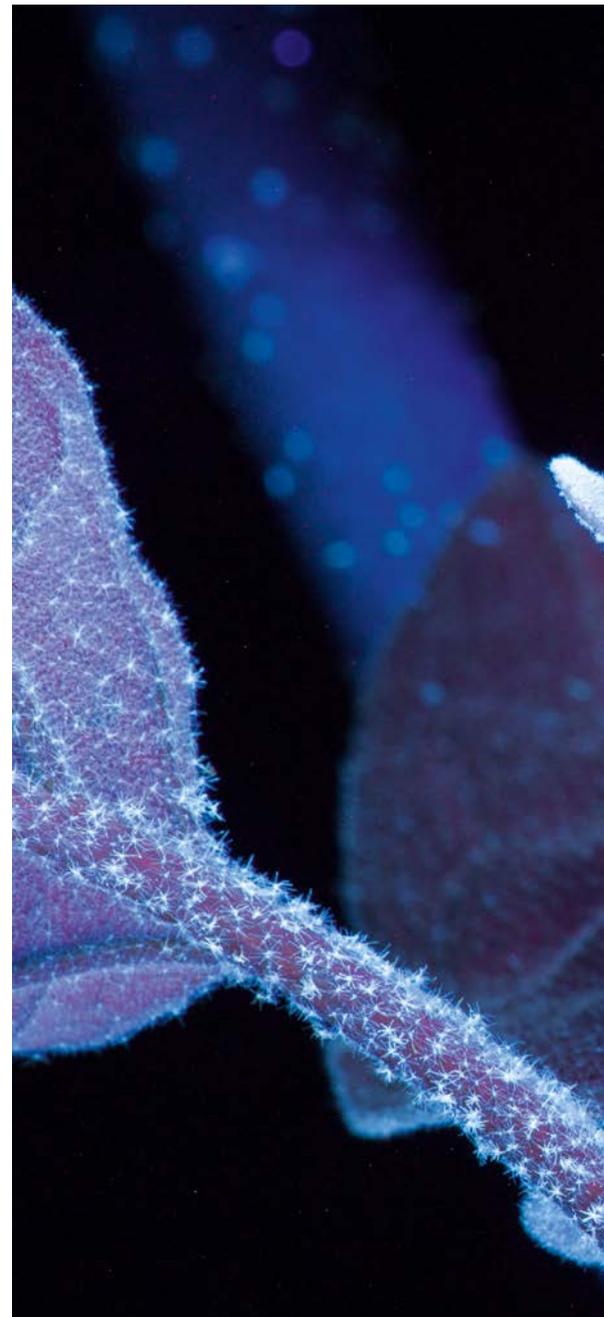
## AUBERGINE (*SOLANUM MELONGENA*)

**Ci-contre.** En lumière blanche, les feuilles et tiges de l'aubergine, vertes, portent de courts poils blancs peu visibles. La corolle est rose et porte, en son centre, les étamines dressées, jaune d'or, productrices de pollen. Chaque pétale porte, à sa base, un sillon médian nectarifère ombré de vert.

**Ci-dessous.** En éclairage ultraviolet, les feuilles et les tiges sont rosées, tapissées de poils étoilés luminescents, bleu clair. La corolle, violette, est également constellée de poils étoilés.

Les sillons nectarifères de la base des pétales sont roses.

Les sommets des pétales sont couverts de poils luminescents denses. Les étamines ouvertes au sommet libèrent le pollen, qui est bleu luminescent. L'insecte, attiré par les balises luminescentes, est ainsi guidé vers le nectar et le pollen.







**MILLEPERTUIS ARBUSTIF  
(*HYPERICUM HEDICOTE*)**

**Ci-contre.** En lumière blanche, la fleur de cet arbuste haut de 1,50 mètre est entièrement jaune. Au centre, le pistil, jaune citron, est entouré d'une couronne d'étamines jaunes, dont les filets sont ombrés de jaune d'or.

**Ci-dessus.** La lumière ultraviolette éteint le jaune des pétales, qui deviennent gris verdâtre, comme la base renflée du pistil (l'ovaire). En revanche, le sommet du pistil, divisé en cinq stigmates destinés à recevoir le pollen, devient bleu-vert luminescent. Les anthères (sacs de pollen) bleues des étamines mûres sont luminescentes ; elles exposent le pollen qui apparaît rose lumineux. Les organes de reproduction que sont les anthères, le pollen et le pistil sont ainsi luminescents, éléments d'attrait pour les insectes.





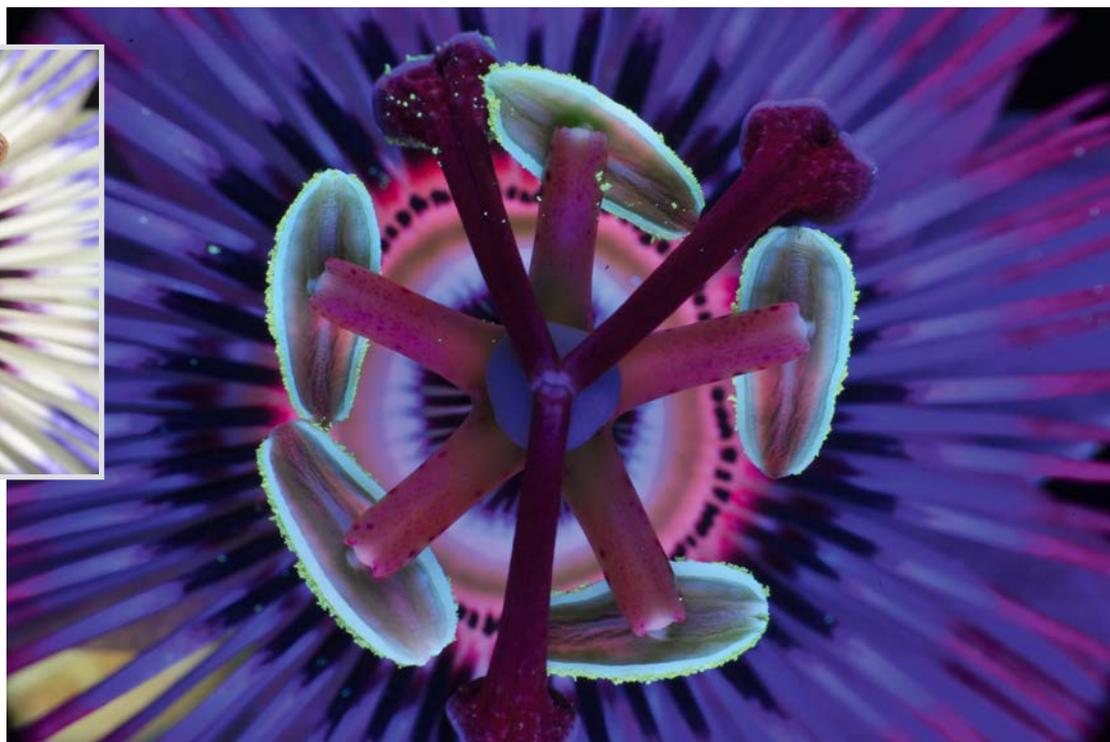
LIERRE (*HEDERA HELIX*)

**Ci-contre.** À l'automne s'épanouissent les fleurs de lierre qui sont vert-jaune, surmontées des cinq anthères jaunes des étamines. Au centre de la fleur, le style, récepteur de pollen, est entouré d'un disque qui sécrète du nectar.

**Ci-dessous.** La lumière ultraviolette différencie les pétales, bleu-mauve, du disque nectarifère, vert-bleu luminescent. Les anthères blanc-jaune, ouvertes, exposent leur pollen luminescent.

La luminescence du disque nectarifère et la couronne de cinq anthères signalent le nectar; en se heurtant aux anthères lorsqu'ils viennent se nourrir, les insectes emporteront du pollen.





PASSIFLORE (*PASSIFLORA CAERULEA*)

**En haut à gauche.** La fleur porte quatre couronnes d'appendices multicolores : deux couronnes de longs appendices fins entourent un anneau d'appendices courts à sommet noir, bordé d'un sillon circulaire et nectarifère, puis une dernière couronne d'appendices dressés. Au centre, une colonne porte cinq étamines vertes à pollen jaune et le pistil blanchâtre avec ses trois stigmates brun foncé.

**Ci-dessus (et pages 58-59).** En ultraviolet, l'anneau d'appendices courts et le sillon nectarifère sont rose vif luminescent. Les marges des anthères ouvertes apparaissent bleu-vert luminescent, tandis que le pollen est jaune-vert luminescent.

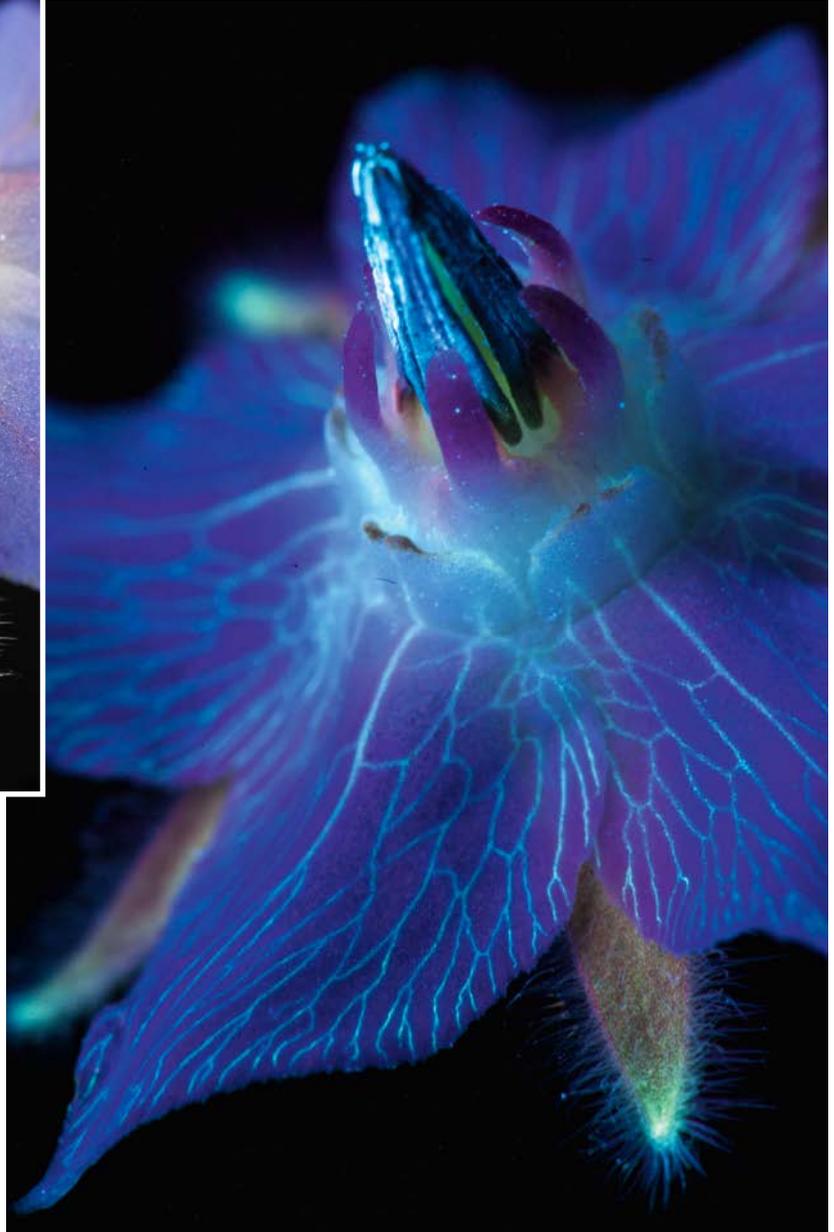


EUPHORBE DES BOIS (*EUPHORBIA AMYGDALOIDES*)

**Ci-dessus.** Les fleurs, réduites aux organes reproducteurs, sont groupées dans une paire de bractées vertes, unies en coupe. En lumière blanche, on voit au cœur de cette coupe un pistil vert pendant (organe femelle), quatre glandes nectarifères jaunes en croissant et, au centre, un bouquet de petites étamines tassées, jaune clair (organes mâles).

**Ci-contre.** En lumière ultraviolette, les bractées apparaissent brun chocolat, tout comme le pistil formé de l'ovaire sphérique dont les styles, fins, se terminent par de petits stigmates blanc verdâtre luminescent. Les glandes en croissant, blanc verdâtre, très luminescentes, entourent le bouquet d'étamines blanches luminescentes elles aussi. La lumière réémise sous éclairage ultraviolet met en évidence la nourriture portée par les glandes et les organes reproducteurs de la plante.

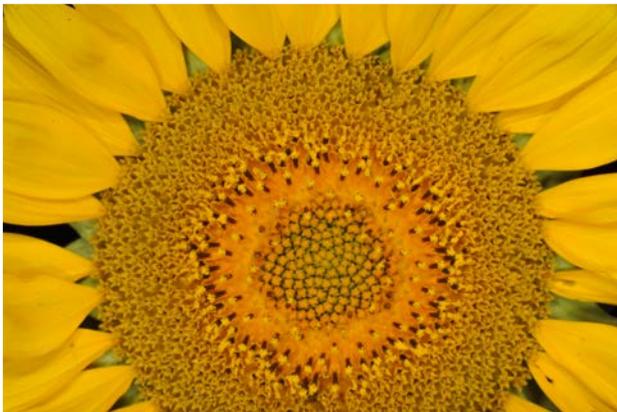




**BOURRACHE (*BORAGO OFFICINALIS*)**

**En haut à gauche.** Cette herbe poilue haute de 50 centimètres porte des fleurs bleu-mauve en lumière naturelle ; les cinq pétales unis ont à leur base des languettes dressées, épaisses, blanches, soulignées de brun à leur sommet ; leur face interne est nectarifère. Au centre de la fleur, les anthères des étamines, noires, sont dressées en un cône étroit entouré d'appendices dressés, pourpres.

**Ci-dessus.** Sous ultraviolets, au sommet de chaque sépale, une tache lumineuse éclaire d'une lueur blanc bleuté les poils voisins. Les pétales, bleu-violet, sont parcourus par un réseau bleu clair lumineux : ce sont les nervures où circule la sève, imperceptibles en lumière blanche ; les nervures anastomosées se ramifient en fines terminaisons sur les bords des pétales. À leur base, la face interne nectarifère des languettes dressées est blanc bleuté, vivement lumineuse. Les anthères, bleu-noir, s'ouvrent par des fentes longitudinales d'où s'échappent les grains de pollen lumineux, bleu clair. Les cinq apex lumineux des sépales, disposés en cercle, ciblent le centre de la fleur où se trouvent nourriture et pollen.



TOURNESOL (*HELIANTHUS ANNUUS*)

**Ci-dessus.** Le capitule, disque de très petites fleurs, laisse voir quatre cycles : au centre, des fleurs en bouton ; autour, des fleurs épanouies aux anthères noires coiffées de jaune ; puis des fleurs plus âgées, jaune grisâtre ; et en périphérie, des fleurs en languettes jaunes évoquant des pétales. **Ci-contre.** L'ultraviolet révèle cinq cycles de fleurs : des boutons, au centre ; des fleurs épanouies, aux anthères bleu vif coiffées d'un amas de pollen blanc lumineux (stade mâle) ; des fleurs ayant perdu leur pollen, aux anthères bleu vif coiffées de stigmates jaunes lumineux (stade femelle) ; des fleurs fanées, où seules subsistent les anthères bleues ; des fleurs en languettes. La différence entre les stades mâle et femelle n'apparaît qu'en ultraviolet.



SERPENTAIRE (*DRACUNCULUS VULGARIS*)

**Ci-dessus.** Les organes floraux sont protégés par un grand cornet pourpre, renflé en ampoule verte à sa base, la spathe, ici sectionnée. Un axe violet, le spadice, porte les fleurs réduites à leurs seuls organes reproducteurs ; à sa base, les fleurs femelles jaune pâle en épi ; au-dessus, les fleurs mâles brunes. **Ci-contre.** Sous ultraviolets, les fleurs femelles apparaissent lumineuses vert-jaune. Elles portent chacune un stigmate court, garni de pollen. Les fleurs mâles sont constellées de grains de pollen lumineux. Au fond de la spathe, une couche de pollen tombé émet une vive luminescence blanc jaunâtre. L'odeur de charogne qui s'échappe de la spathe et les organes reproducteurs qui y luisent attirent des mouches.





## GLOSSAIRE

### ÉTAMINE

Organe mâle de la fleur, qui produit le pollen. L'étamine est constituée de l'**ANTHÈRE**, partie supérieure qui contient le pollen, portée par une partie mince et allongée, le **FILET**.

### PISTIL

Organe femelle de la fleur. Le pistil est formé d'un ou de plusieurs **CARPELLES**. La partie inférieure du pistil est l'**OVAIRE**, qui contient les ovules. L'ovaire est prolongé par le **STYLE**, qui porte le **STIGMATE** destiné à accueillir les grains de pollen.

### COROLLE

Ensemble des **PÉTALES**.

### CALICE

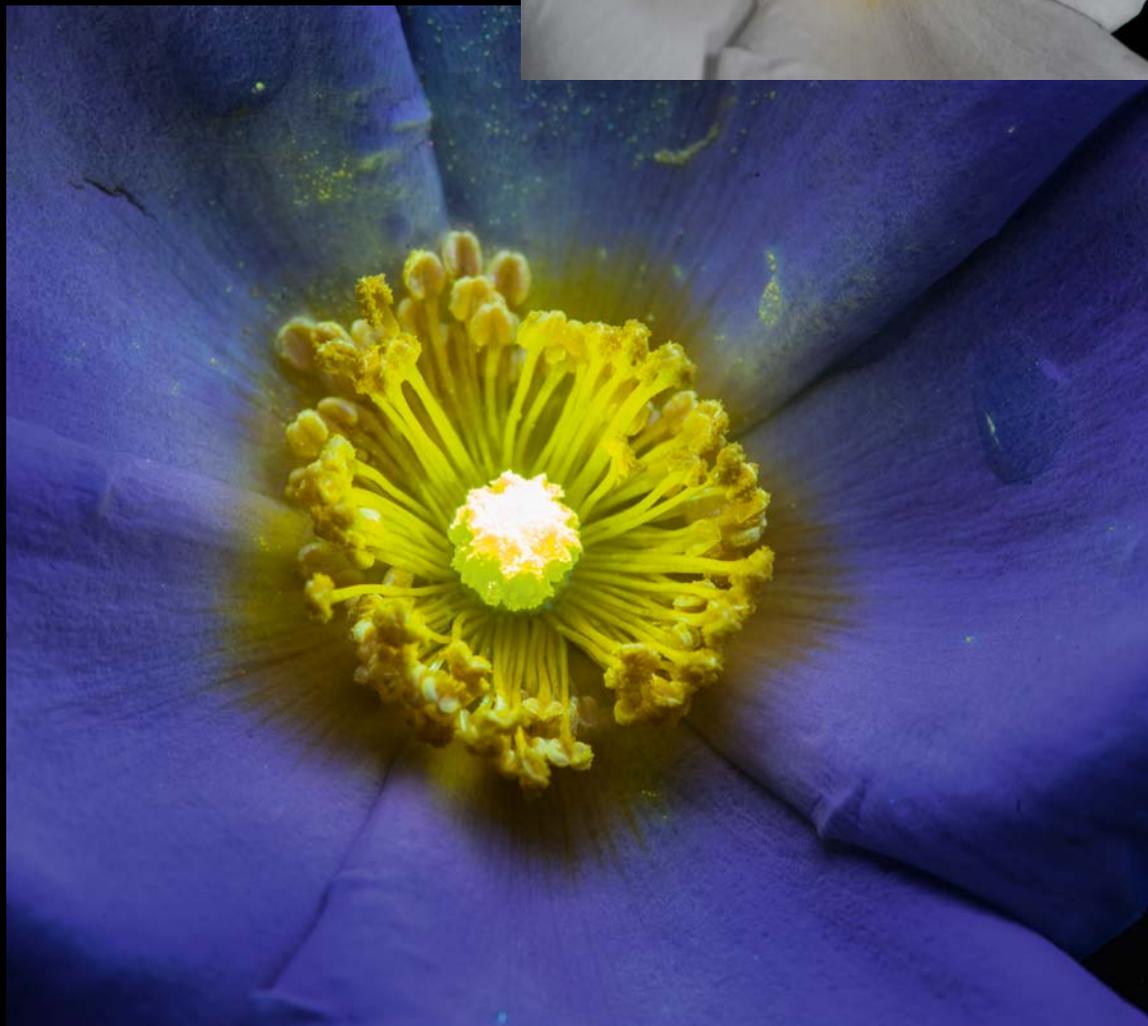
Ensemble des **SÉPALES**, à la base de la fleur.

### CISTE À FEUILLES DE SAUGE (*CISTUS SALVIIFOLIUS*)

**Ci-contre.** Les cinq pétales blancs de la fleur sont ombrés de jaune à leur base. Une collerette de nombreuses étamines forme une cuvette orange vif, qui entoure un groupe de styles jaunâtres, courts, se terminant par des stigmates blancs.

**Ci-dessous.** L'ultraviolet fait apparaître les pétales bleu-violet, et la base bistre-jaune. Les stigmates émettent une vive luminescence blanche qui illumine les étamines d'une lueur jaune verdâtre. Les anthères bistre, ouvertes, libèrent du pollen luminescent blanc jaunâtre.

Sur les pétales, du pollen disséminé par des insectes forme des traînées luminescentes jaune pâle.



## BIBLIOGRAPHIE

B. Valeur, **Lumière et luminescence**, Belin, 2017.

H. Angel, **Pollination Power**, Kew Publishing, 2015.

B. Valeur et E. Bardez, **La lumière et la vie, une subtile alchimie**, Belin/Pour la Science, 2015.

S. Tanzarella, **Perception et communication chez les animaux**, De Boeck, 2005.



## L'ESSENTIEL

> Plusieurs dizaines d'habitants d'une ville soviétique sont morts de la maladie du charbon en 1979, à la suite d'un accident survenu dans une unité secrète de recherche et production d'armes biologiques.

> Les autorités militaires soviétiques ont longtemps caché la nature de cet incident,

qui aurait pu faire moins de victimes si les autorités civiles avaient été informées au moment où il s'est produit.

> Aujourd'hui, grâce aux recherches de scientifiques et aux témoignages recueillis, on sait plus précisément ce qui s'est passé et quelles étaient les caractéristiques des agents pathogènes fabriqués.

## LES AUTEURS



PAUL KEIM  
université de  
l'Arizona du Nord,  
aux États-Unis



DAVID H. WALKER  
université du Texas  
à Galveston,  
aux États-Unis



RAYMOND  
A. ZILINSKAS  
institut Middlebury  
à Monterey,  
aux États-Unis

# Des bacilles du charbon dans l'air soviétique

LES ARMES BIOLOGIQUES SONT DANGEREUSES POUR TOUT LE MONDE.  
ILLUSTRATION AVEC UN ACCIDENT SURVENU EN UNION SOVIÉTIQUE  
IL Y A PRÈS DE QUARANTE ANS, ET DONT ON CONNAÎT MIEUX  
AUJOURD'HUI LES DÉTAILS.

**L**e 2 avril 1979, une poudre mystérieuse et invisible s'échappait d'une cheminée qui s'élevait 25 mètres au-dessus d'une base militaire soviétique, à 1 400 kilomètres à l'est de Moscou. Dans les semaines qui suivirent, au moins 80 habitants de Sverdlovsk, la ville voisine aujourd'hui nommée Iekaterinbourg, sont tombés malades de ce qui, à première vue, ressemblait à la grippe. Après quelques jours, cependant, ils développèrent notamment d'importantes hémorragies internes, et au moins 68 d'entre eux succombèrent à l'affection.

Quelques rares personnes de la base, appelée Complexe 19, savaient ce qui s'était passé : l'absence de certains filtres à air avait provoqué la fuite de spores bactériennes depuis une unité militaire secrète installée sur le site. Les spores provenaient d'une souche de bactéries *Bacillus anthracis*, responsables de la maladie du charbon (*anthrax* en anglais, ce mot désignant en français une maladie différente), et que l'on trouve à l'état naturel dans de nombreuses régions du monde. Mais ces spores particulières avaient la bonne taille pour être facilement inhalées dans les poumons, où elles peuvent faire le plus de dégâts. Une fois à l'intérieur du corps, les spores germent et adoptent la forme habituelle, en bâtonnet, du bacille. Les bactéries commencent alors à se multiplier, se propagent dans la circulation sanguine et attaquent >

> divers tissus. La forme respiratoire de la maladie du charbon tue habituellement en quelques jours, sauf si un traitement antibiotique est rapidement administré.

L'armée soviétique ne révéla cependant pas la nature de l'épidémie, pas même aux autorités locales de santé publique, qui auraient pu sauver plus de vies si elles avaient su de quoi il retournait. Malgré les efforts acharnés du KGB pour garder secret cet événement, la nouvelle de l'accident se diffusa à l'extérieur de la base à l'automne 1979.

## UNE SURPRISE POUR LES SERVICES DE RENSEIGNEMENT OCCIDENTAUX

Ces informations stupéfièrent notamment les services de renseignement occidentaux, qui n'avaient décelé aucun indice suggérant que l'Union soviétique développait des armes biologiques – en violation flagrante d'un traité qui en interdit le développement, la production, l'accumulation et l'utilisation. Plus de cent pays, dont l'Union soviétique et les États-Unis, avaient signé en 1972 cette « Convention sur les armes biologiques ». Pourtant, les États-Unis n'ont pas porté plainte formellement contre l'Union soviétique.

Comme, dans les années 1970, la révolution du génie génétique avait déjà débuté, les spécialistes occidentaux du renseignement ont suspecté que les chercheurs soviétiques avaient génétiquement modifié *B. anthracis* à Sverdlovsk pour le rendre plus létal. Il a fallu trente-sept ans pour prouver que ce n'était pas le cas, comme nous le verrons plus loin.

L'Union soviétique finit par admettre qu'un certain nombre de personnes étaient mortes de la maladie du charbon autour de Sverdlovsk, mais nia que quoi que ce soit d'inhabituel fût survenu. La vraie cause de la tragédie, selon les autorités soviétiques, était la maladie du charbon sous sa forme gastro-intestinale, à la suite de la préparation et la consommation d'animaux infectés par des spores normalement présentes. Cette affirmation a été plus tard démentie par des experts internationaux, qui ont pu examiner des échantillons d'autopsie conservés par des pathologistes locaux.

Finalement, en 1992, le président russe Boris Eltsine admit que l'ex-Union soviétique avait mis en place un vaste programme de recherche et production d'armes biologiques. Bien qu'il ait déclaré avoir immédiatement ordonné la fermeture du programme, des documents déclassifiés ont, depuis, clairement montré que l'armée russe a simplement caché aux autorités civiles ce qui restait de cet effort.

Revenons à la maladie du charbon. Dans les conditions naturelles, cette affection touche surtout les animaux et a longtemps préoccupé les éleveurs, les trieurs de laine et les tanneurs.



Des colonies de *Bacillus anthracis* cultivées en boîte de Petri.

Vers 1876, le scientifique allemand Robert Koch fut le premier à prouver qu'un germe particulier (*B. anthracis*) provoquait la maladie du charbon. Quelques années plus tard, en 1881, Louis Pasteur développait un vaccin efficace contre cette maladie.

Koch a montré que ces bactéries prennent la forme de longs bâtonnets dans un environnement propice à une croissance rapide – tel que l'intérieur du corps d'un animal, humide et riche en nutriments. Mais en conditions arides, les microbes produisent des spores dures, quasi indestructibles, qui peuvent rester inactives longtemps. Lorsqu'on injectait ces spores à des souris saines, elles redonnaient des bacilles, ce qui déclenchait la maladie et tuait les animaux.

Le diagnostic précoce et le traitement de la maladie du charbon sont cruciaux pour la survie des personnes atteintes. Le taux de mortalité des infections non traitées dépend de la voie d'entrée des germes. Inhaler ne serait-ce que quelques spores peut être fatal sans traitement approprié. La mortalité des infections cutanées non traitées est d'environ 10%; celle de la forme gastro-intestinale est inconnue, mais estimée entre 25 et 60%.

Les stratèges militaires du xx<sup>e</sup> siècle se sont vite rendu compte que l'on pourrait utiliser l'agent de la maladie du charbon pour créer de nouvelles armes de destruction massive. Ses avantages sont évidents. Séchées et gardées au frais, les spores du bacille du charbon résistent plusieurs années, ce qui permet une production à l'échelle industrielle et l'accumulation du matériel longtemps avant son utilisation sur le champ de bataille. De plus, tout sol contaminé par les spores le resterait pendant des décennies, ce qui affecterait sérieusement la capacité de l'ennemi à élever du bétail dans les champs touchés.

La forme respiratoire de la maladie offre un autre avantage à celui qui veut semer la terreur

en plus de la mort parmi la population civile: il est difficile de bien la diagnostiquer à ses débuts. Les symptômes initiaux sont souvent modérés: fièvre, fatigue et douleurs musculaires, qui rappellent la grippe ou la pneumonie. Plusieurs jours plus tard, les personnes atteintes développent soudain une détresse respiratoire, leurs lèvres bleuissent et des fluides commencent à s'accumuler dans leur poitrine; à ce stade, la mort est généralement inévitable. L'autopsie montre les motifs caractéristiques d'hémorragies internes dans les ganglions lymphatiques proches des poumons et dans les tissus qui entourent le cerveau.

Aucun étranger n'a jamais été admis dans l'enceinte du Complexe 19 – sans parler de son institut de microbiologie, où l'accident s'est produit. Au cours des dernières décennies, cependant, et particulièrement après la dissolution de l'Union soviétique en 1991, nous et d'autres avons pu reconstituer une chronologie de l'accident. Nous avons mené de nombreux entretiens avec des scientifiques, médecins et techniciens qui travaillaient à Sverdlovsk ou qui avaient des collègues à l'intérieur de l'institut. La plupart des faits qui suivent ont été publiés par nous ainsi que par des transfuges soviétiques.

## LA CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT RECONSTITUÉE

Sur la base de ces informations, le programme soviétique d'armement biologique aurait démarré en 1928. À son apogée, à la fin des années 1980, il employait environ 60000 personnes. *Bacillus anthracis* est rapidement devenu l'un des pathogènes les plus importants du programme. Les recherches ont montré qu'on pouvait facilement le militariser, c'est-à-dire le produire sous une forme stable, susceptible d'être dispersée massivement.

Lorsqu'un laboratoire militaire fut installé en 1949 sur le site d'une ancienne école d'infanterie près de Sverdlovsk, il se trouvait bien au-delà des limites de la ville. Quinze ans plus tard, cependant, la ville avait grandi et s'étendait alors autour de l'installation secrète. Malgré la proximité de la population civile, le ministère de la Défense décida de moderniser l'installation dans les années 1960 afin qu'elle puisse produire les tonnes de spores de *B. anthracis* nécessaires à un programme fiable d'armement biologique. (Les États-Unis avaient installé de telles unités de production – ultérieurement démantelées – dans l'Arkansas, au milieu des années 1950.)

Les Soviétiques ont équipé un bâtiment de quatre étages à Sverdlovsk de cuves de fermentation pour cultiver *B. anthracis* et d'appareils de séchage pour forcer les bactéries à produire des spores – étapes normales pour une production industrielle. La vraie innovation repose dans les étapes suivantes. Certains produits chimiques (nous ignorons encore lesquels) étaient ajoutés

pour que les spores ne s'agrègent pas, ce qui formerait des particules trop grosses pour s'introduire dans les poumons. La substance obtenue était alors desséchée et broyée en une fine poudre, capable de pénétrer profondément dans les voies respiratoires. Le produit fini était stocké dans des fûts en inox.

Inévitablement, tout ce processus entraînait la dispersion de spores mortelles dans le bâtiment. Les employés portaient de grosses combinaisons (hazmat) de protection, mais l'air devait également être filtré avant d'être évacué à l'extérieur. La solution était assez simple. Par exemple, les flux contaminés émanant de chaque séchoir passaient à travers une série de filtres qui en éliminaient les grosses particules, telles que la poussière ordinaire, et les petites, telles que les spores du bacille du charbon.

Le 2 avril 1979, alors que les séchoirs étaient éteints, l'équipe de jour de l'unité de production retira deux filtres pour vérifier leur état de fonctionnement. Cette équipe déclarera plus tard qu'elle avait averti le centre des opérations qu'il ne fallait pas utiliser le séchoir correspondant avant que ces filtres soient remplacés. Mais, pour une raison inconnue, l'équipe de nuit ne fut pas informée et, en prenant son service, enclencha le cycle habituel de production et séchage. Comme certains filtres de la série manquaient, un autre se retrouva bouché et éclata, ce qui entraîna une augmentation soudaine de la pression de l'air dans le système d'aération.

Un ouvrier remarqua tout de suite l'incident et les 30 à 40 membres de l'équipe de nuit se précipitèrent pour arrêter le système. Mais le processus de production, complexe, ne pouvait

# Le programme soviétique d'armement biologique aurait démarré en 1928

être stoppé immédiatement; cela prit trois heures, durant lesquelles un nombre inconnu de spores s'échappèrent de la cheminée.

## SILENCE DES AUTORITÉS

Après que l'équipe de nuit comprit ce qui venait de se passer, son chef informa le commandant du Complexe 19, le général >

### À PROPOS DES AUTEURS



**PAUL KEIM**  
est directeur exécutif de l'Institut du pathogène et du microbiome à l'université de l'Arizona du Nord, à Flagstaff.



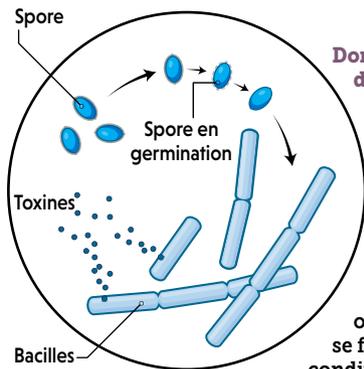
**DAVID H. WALKER**  
est directeur exécutif du Centre pour la biodéfense et les maladies infectieuses émergentes de l'université du Texas à Galveston.



**RAYMOND A. ZILINSKAS**  
dirige le programme de non-prolifération des armes chimiques et biologiques à l'Institut Middlebury d'études internationales.

## TROIS FORMES DE LA MALADIE DU CHARBON

La maladie du charbon est due à la bactérie *Bacillus anthracis* et se manifeste sous différentes formes selon le mode de pénétration dans l'organisme (voir ci-contre). Lorsque l'infection atteint la circulation sanguine, elle peut rapidement devenir fatale. Naturellement répandue dans le monde, la bactérie *B. anthracis* a plusieurs propriétés qui font d'elle un agent potentiellement hautement efficace pour des armes biologiques. Notamment, elle produit des spores très résistantes que l'on peut traiter de façon qu'elles ne s'agglomèrent pas et qu'elles puissent pénétrer profondément dans les poumons, où elles déclenchent la forme la plus létale de la maladie du charbon.



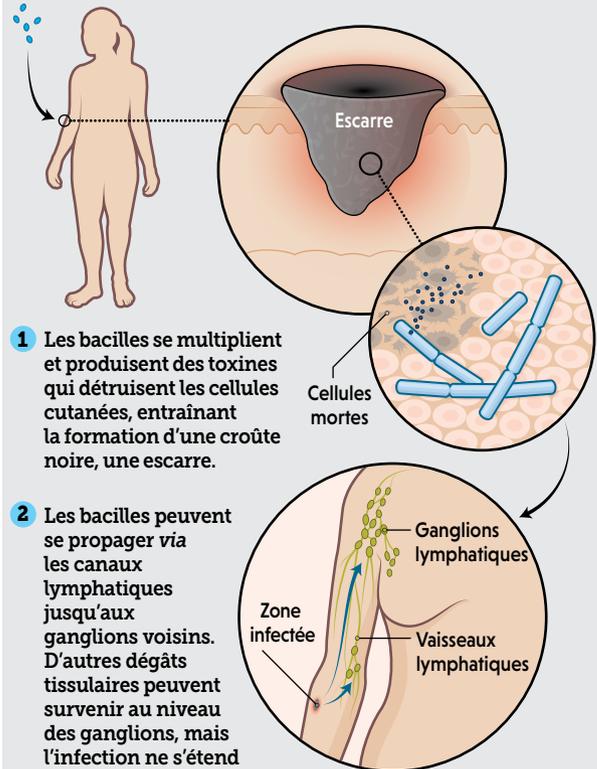
### Dormance sous forme de spores

L'agent de la maladie du charbon peut exister sous deux formes : soit un bacille en forme de bâtonnet, qui peut se multiplier et libérer des toxines, soit une spore dure qui est en état de dormance, ou biostase. Les spores se forment lorsque les conditions sont trop sèches.

Mais lorsque les conditions sont bonnes – comme à l'intérieur du corps, humide et riche en nutriments –, les spores germent et donnent naissance à de nombreux bacilles infectieux.

### Forme cutanée

Depuis des siècles et jusqu'à nos jours, la forme la plus commune et la moins létale de la maladie du charbon se déclare lorsque *B. anthracis* infecte la peau et forme une lésion qui ressemble, au début, à une morsure d'araignée.



1 Les bacilles se multiplient et produisent des toxines qui détruisent les cellules cutanées, entraînant la formation d'une croûte noire, une escarre.

2 Les bacilles peuvent se propager via les canaux lymphatiques jusqu'aux ganglions voisins. D'autres dégâts tissulaires peuvent survenir au niveau des ganglions, mais l'infection ne s'étend généralement pas jusqu'à la circulation sanguine.

> V. V. Mikhaylov, de l'accident. Ce dernier avertit l'état-major du ministère de la Défense, à Moscou, qui lui demanda de garder le silence. Le KGB confisqua par la suite tous les rapports médicaux et les rapports d'autopsie des victimes. Des experts ont plus tard estimé qu'entre 0,5 et 1 kilogramme de matière contaminée, contenant entre quelques milligrammes et 1 gramme de spores, s'était échappé. En admettant que les spores étaient viables et largement dispersées, elles auraient pu infecter plusieurs centaines de milliers d'habitants de Sverdlovsk, qui en comptait plus de 1,2 million. Heureusement, les vents dominants soufflaient à l'écart du centre urbain et vers des zones moins densément peuplées.

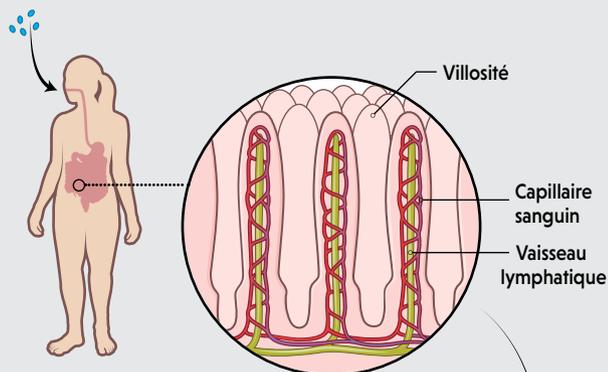
Petit à petit, nous en avons appris davantage sur la biologie de la souche de *B. anthracis* responsable de la tragédie de Sverdlovsk. Dans les années 1990, par exemple, Matthew Meselson, de l'université Harvard, a dirigé une

équipe d'experts sur deux études médicales et épidémiologiques différentes à Sverdlovsk. Les progrès des biotechnologies ont également permis d'analyser plus en détail les échantillons que les médecins russes avaient partagés avec les équipes internationales dans les années 1990, période plus coopérative. L'un de nous (David Walker) a accompagné Matthew Meselson lors du premier voyage et a rencontré les pathologistes locaux pour mieux comprendre les événements. Plus tard, l'un d'eux, Lev Grinberg, a apporté aux États-Unis des échantillons d'autopsie des victimes pour une étude plus poussée. Un autre d'entre nous (Paul Keim) a travaillé avec Paul Jackson, alors au Laboratoire américain de Los Alamos, pour extraire l'ADN des échantillons, ce qui a confirmé que les victimes étaient mortes de la maladie du charbon.

D'autres scientifiques ont ultérieurement mis en évidence une signature génétique unique

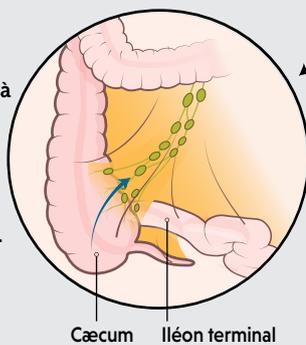
### Forme gastro-intestinale

Les animaux vivant en troupeau sont particulièrement vulnérables à la maladie du charbon. En mangeant de la viande d'animaux malades, on peut contracter une infection au niveau des intestins, surtout si la viande est mal cuite.

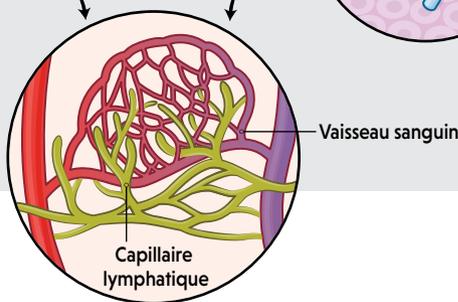


1 Bien que le mécanisme exact reste à préciser, les bactéries infectent les villosités de la paroi intestinale, vers l'extrémité de l'intestin grêle (iléon terminal).

2 Les bacilles se propagent parfois au-delà du système gastro-intestinal, à travers les vaisseaux lymphatiques.

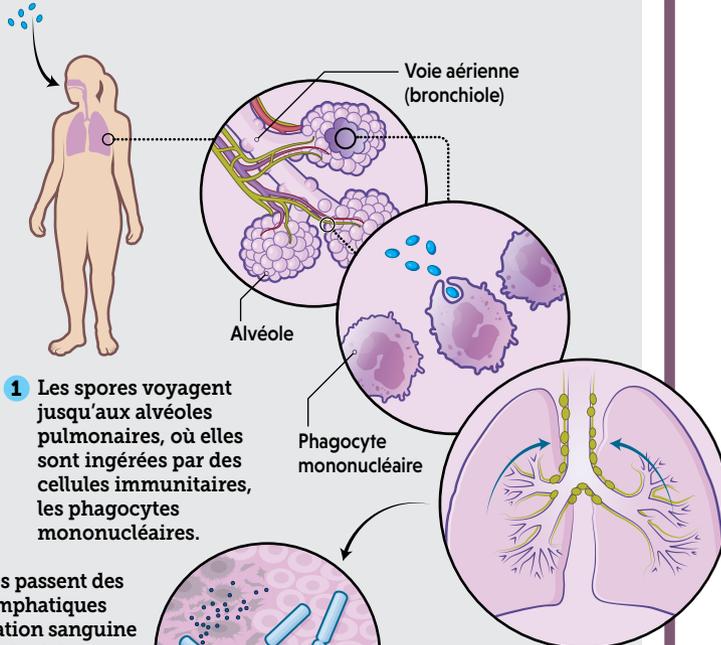


3 Les bacilles passent des canaux lymphatiques à la circulation sanguine et se répandent dans tout le corps.



### Forme respiratoire

Cette forme la plus mortelle de la maladie apparaît lorsque les spores de *B. anthracis* sont inspirées. Les échantillons d'autopsie de l'épidémie de 1979 dans la ville de Sverdlovsk prouvent que les victimes sont mortes de cette maladie.



1 Les spores voyagent jusqu'aux alvéoles pulmonaires, où elles sont ingérées par des cellules immunitaires, les phagocytes mononucléaires.

2 Quand les spores atteignent les ganglions lymphatiques de la poitrine, elles se muent en bacilles, qui se multiplient et sécrètent des toxines.

de la souche de Sverdlovsk, notée *B. anthracis* 836. Grâce à cette empreinte moléculaire, les scientifiques peuvent désormais traquer cette souche au niveau global. En 2001, les chercheurs ont ainsi déterminé que l'attaque à la lettre piégée aux bacilles du charbon, qui a tué cinq personnes aux États-Unis, n'avait pas utilisé la souche de Sverdlovsk.

## LE GÉNOME BACTÉRIEN RECONSTITUÉ

Enfin, en 2015, les avancées technologiques ont permis à Paul Keim et d'autres de reconstituer la séquence complète du génome de *B. anthracis* à partir des échantillons d'autopsie de deux victimes de Sverdlovsk. L'analyse, publiée en 2016, a montré que la souche *B. anthracis* 836 appartenait à un groupe bien connu, nommé Trans-Eurasia. De plus, les auteurs de l'étude n'ont trouvé aucune preuve de modifications génétiques destinées à

augmenter la virulence ou la résistance aux antibiotiques, ou à altérer la protection vaccinale.

Nul ne sait si des lots de *B. anthracis* produits par l'Union soviétique existent toujours. Dans les années 1990, à la suite d'un accord conclu entre les États-Unis, l'Ouzbékistan et le Kazakhstan, plusieurs tonnes de matériel contenant des spores ont été inactivées et certaines unités de production de ces républiques de l'ex-Union soviétique ont été converties à un usage civil, et ce sous l'œil vigilant de scientifiques internationaux. Cependant, en Russie, aucun groupe étranger n'a été autorisé à visiter, ni *a fortiori* à inspecter, les trois instituts du ministère de la Défense ou les cinq centres civils « anti-épidémiques » qui ont joué un rôle dans la recherche et la production d'agents pour armes biologiques. Ce manque de transparence et divers autres indices laissent hélas planer un soupçon sur la poursuite par la Russie d'un programme d'armement biologique... ■

## BIBLIOGRAPHIE

E. Aucouturier, **La Guerre biologique. Aventures françaises**, Éditions Matériologiques, 2017.

**A history of anthrax**, Centers for Disease Control and Prevention, 2016 : [www.cdc.gov/anthrax/resources/history](http://www.cdc.gov/anthrax/resources/history)

C. Boddie et al., **Assessing the bioweapons threat**, Science, vol. 349, pp. 792-793, 2015.

M. Leitenberg et R. A. Zilinskas, **The Soviet Biological Weapons Program : A History**, Harvard Univ. Press, 2012.

## R

ENDEZ-VOUS

- P.74 Logique & calcul  
 P.80 Art & science  
 P.82 Idées de physique  
 P.86 Science & fiction  
 P.92 Chroniques de l'évolution  
 P.96 Science & gastronomie  
 P.98 À picorer

# TRIVIAL, MAIS PUISSANT: LE PRINCIPE DES TIROIRS

Le «principe des tiroirs» est une évidence. Pourtant, depuis son introduction en théorie des nombres par Dirichlet, au XIX<sup>e</sup> siècle, il s'est révélé être un levier de raisonnement d'une déconcertante efficacité.

## L'AUTEUR



**JEAN-PAUL DELAHAYE**  
 professeur émérite  
 à l'université de Lille  
 et chercheur au Centre  
 de recherche en  
 informatique, signal  
 et automatique de Lille  
 (Cristal)

**U**ne vérité totalement évidente peut-elle être utile? Il semble que oui. Le principe des tiroirs, *pigeonhole principle* en anglais, ne fait qu'affirmer une vérité générale, simple et indubitable. Nous allons voir que, pourtant, s'appuyer sur lui produit d'intéressants et puissants résultats.

### Le principe des tiroirs

*Soit un meuble comportant  $n$  tiroirs dans lequel sont rangés  $m$  objets. Si  $m > n$ , alors au moins l'un des tiroirs contient deux objets ou plus.*

Ce principe a été utilisé dans deux publications de 1842 du mathématicien allemand Johann Dirichlet qui, à ce moment-là, ne le nommait pas. Dans des publications ultérieures, il utilisera le mot *Schubfachprinzip* («principe des tiroirs» en allemand). Il est cependant difficile de savoir qui a vraiment été le premier à utiliser ce principe pour formuler un raisonnement mathématique. Il a très bien pu être découvert ou mis en œuvre sans même être explicité à n'importe quel instant depuis que les mathématiques existent.

Dans une étude historique publiée en 2014, Benoît Rittaud, de l'université Paris-13, et Albrecht Heeffer, de l'université de Gand, ont mis en évidence des utilisations du principe deux siècles avant Dirichlet (voir l'encadré 1). Reste que, presque toujours, on rapporte le principe à Dirichlet: on ne prête qu'aux riches. L'utilisation qu'en a fait Dirichlet a produit un résultat remarquable dont personne ne peut dire qu'il est évident.

La célèbre démonstration de Dirichlet est expliquée dans l'encadré 3 avec quelques conséquences et des détails montrant que le résultat est, en un sens, le meilleur possible.

### TROIS EXEMPLES

À titre d'illustration de la puissance du principe des tiroirs, nous présentons une série d'exemples le mettant en œuvre, dans un ordre de difficulté croissante.

**Résultat 1.** Si  $k+1$  nombres entiers (notés  $n_0, n_1, \dots, n_k$ ) sont donnés, on peut en trouver deux dont la différence est un multiple de  $k$ . En particulier, si quatre nombres  $a, b, c$  et  $d$  sont donnés, il y en a deux dont la différence est un multiple de 3.

**Démonstration.** Prenons les nombres un à un et mettons-les dans  $k$  tiroirs portant les numéros  $0, 1, \dots, k-1$ . Pour ranger le nombre  $x$ , on calcule le reste de la division de  $x$  par  $k$ , et ce reste indique le tiroir où le déposer. D'après le principe des tiroirs, deux nombres se retrouveront dans un même tiroir. Puisque ces deux nombres ont le même reste quand on les divise par  $k$ , leur différence donne un reste nul quand on la divise par  $k$ . Leur différence est ainsi un multiple de  $k$ .

**Résultat 2.** Si l'on se donne 10 entiers quelconques composés de deux chiffres, il existe parmi eux deux sous-ensembles disjoints de nombres ayant la même somme. Par exemple, si l'on se donne  $\{23, 35, 44, 61, 68, 70, 71, 82, 83, 95\}$ , on trouvera que  $\{23, 35, 95\}$  donne la même somme que  $\{71, 82\}$ :  $23+35+95=153=71+82$ .

**Démonstration.** Les sous-ensembles possibles de notre ensemble de 10 entiers sont au nombre de  $2^{10}=1024$ , car pour constituer un tel sous-ensemble, on opère 10 fois de suite le choix binaire: prendre le nombre ou ne pas le prendre. Quels nombres peut-on atteindre en faisant la somme des nombres de nos sous-ensembles? Un sous-ensemble comporte de 0 à 10 nombres compris entre 10 et 99; la somme



Jean-Paul Delahaye a récemment publié: **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

## QUI A INVENTÉ LE PRINCIPE DES TIROIRS?

# 1

**B**enoît Rittaud et Albrecht Heeffer ont retrouvé un texte utilisant de manière indubitable le principe des tiroirs dans un livre écrit en latin en 1622, *Selectæ Propositiones*, attribué au jésuite français Jean Leurechon (1591-1670) de Pont-à-Mousson (voir la bibliographie). On y trouve l'affirmation que, nécessairement, il existe deux femmes ayant le même nombre de cheveux. La démonstration n'est pas explicitée, mais ne peut provenir que de l'application du principe des tiroirs. Dès 1625, l'idée est d'ailleurs reprise, en se référant au livre du jésuite, par l'ecclésiastique Marin Mersenne (1588-1648), qui a laissé son nom à une catégorie de nombres premiers toujours très populaire.



Treize pigeons pour 12 casiers : nécessairement, au moins un casier contient plus de 1 pigeon.

Mersenne écrit dans son livre *La Vérité des sciences* : « Il est nécessaire que deux hommes aient autant de cheveux, d'escus, & d'autres choses l'un comme l'autre ». Le raisonnement fait bien appel à ce que nous appelons le principe de tiroirs : si le nombre maximum de cheveux est 200 000, alors dans toute population supérieure à ce nombre, deux personnes ont nécessairement le même nombre de cheveux. Aucune trace plus ancienne d'utilisation du principe des tiroirs n'est pour l'instant identifiée. En conclusion, il faudrait, si l'on souhaite rapporter le principe à un auteur, le dénommer « principe de Leurechon » plutôt que « principe de Dirichlet ».

est donc comprise entre 0 et 10 fois 99, donc entre 0 et 990. En numérotant 991 tiroirs de 0 à 990, et en plaçant chaque sous-ensemble possible dans le tiroir dont le numéro est la somme de ses éléments, on trouve d'après le principe des tiroirs deux sous-ensembles ayant la même somme.

Le problème n'est cependant pas vraiment résolu, car on nous demande de trouver des sous-ensembles *disjoints* ayant la même somme, et rien ne nous permet d'affirmer que les deux sous-ensembles trouvés à l'instant le sont. Ce n'est pas très grave : si les sous-ensembles ont des éléments en commun, on les enlève. Les deux sous-ensembles alors obtenus ont encore la même somme, car on a enlevé les mêmes éléments, et cette fois ce sont deux sous-ensembles disjoints.

**Résultat 3.** Soit  $S$  une suite quelconque composée de  $N$  nombres entiers tous différents. On considère une sous-suite croissante de  $S$  de la plus grande longueur possible,  $C$ , et en même temps on considère une sous-suite décroissante de  $S$  de la plus grande longueur possible,  $D$ . Alors  $DC \geq N$ , affirmation qui signifie qu'il est impossible que les sous-suites croissantes et décroissantes de  $S$  soient toutes très courtes.

Ce résultat montre qu'il existe nécessairement une forme d'ordre dans toute suite de nombres ; c'est l'un des premiers résultats de la « théorie de Ramsey ».

Exemple : Partant de la suite (1, 3, 9, 4, 13, 8, 11, 2, 7, 6) de longueur  $N=10$ , en cherchant attentivement, on découvre que la plus longue sous-suite croissante de  $S$  est (1, 3, 4, 8, 11), de longueur  $C=5$ , et que les plus longues sous-suites décroissantes sont (13, 11, 7, 6), (13, 8, 7, 6)

et (9, 8, 7, 6), de longueur  $D=4$ . Comme annoncé, on constate que  $DC=20 \geq N=10$ .

**Démonstration.** Pour chaque nombre  $x$  de la suite  $S$ , on calcule deux nombres  $c$  et  $d$  qui sont d'une part la longueur de la plus longue sous-suite croissante extraite de  $S$  partant de  $x$ , d'autre part la longueur de la plus longue sous-suite décroissante extraite de  $S$  partant de  $x$ . Ces deux nombres  $c$  et  $d$  déterminent un tiroir dans lequel on place  $x$ . On a bien sûr  $c \leq C$  et  $d \leq D$  ; le nombre de tiroirs nécessaires pour ranger les  $N$  nombres de la suite  $S$  est donc inférieur ou égal au produit  $CD$ .

Supposons que  $CD < N$ . D'après le principe des tiroirs, il existe alors deux nombres  $x$  et  $y$  de la suite  $S$  qui se retrouvent dans le même tiroir. Les deux nombres  $x$  et  $y$  sont donc chacun le début d'une suite croissante de longueur  $c$  impossible à prolonger, et d'une suite décroissante de longueur  $d$  elle aussi impossible à prolonger. Par hypothèse, puisque  $x$  et  $y$  sont dans le même tiroir, le même  $c$  vaut pour  $x$  et  $y$ , et le même  $d$  vaut pour  $x$  et  $y$ . Sans perte de généralité, on peut supposer que  $x$  est placé avant  $y$  dans la suite  $S$ . Deux cas sont à considérer.

Si  $x < y$ , alors la sous-suite qui commence par  $x$  et qui se poursuit par la sous-suite croissante de longueur  $c$  commençant par  $y$  est une sous-suite croissante de  $S$  partant de  $x$  et de longueur  $c+1$ , ce qui contredit le fait que  $c$  est la longueur de la plus longue sous-suite croissante de  $S$  qui commence à  $x$ .

Si  $x > y$ , alors la sous-suite qui commence par  $x$  et qui se poursuit par la sous-suite décroissante de longueur  $d$  commençant par  $y$  est une sous-suite décroissante de  $S$  partant de  $x$  et de longueur  $d+1$ , ce qui contredit le fait >

> que  $d$  est la longueur de la plus longue sous-suite décroissante de  $S$  qui commence par  $x$ .

Dans chaque cas, nous avons trouvé une contradiction. L'hypothèse faite, à savoir que  $CD < N$ , est donc fautive. Autrement dit, nous avons prouvé que  $CD \geq N$ .

**VARIANTE AVEC  
BEAUCOUP D'OBJETS**

On a souvent beaucoup plus d'objets à ranger qu'on ne dispose de tiroirs. La version généralisée suivante du principe des tiroirs sera alors un bon outil.

**Principe général des tiroirs**

*Soit  $k$  un nombre entier, et un meuble de rangement comportant  $n$  tiroirs dans lequel sont rangés  $m$  objets. Si  $m > kn$ , alors au moins l'un des tiroirs contient plus de  $k$  objets.*

C'est évident, car si chaque tiroir contenait  $k$  objets ou moins, alors au total dans le meuble de  $n$  tiroirs ne seraient rangés que  $kn$  objets ou moins. La version suivante signifie la même chose, mais s'énonce sans mentionner de variable.

**Principe général des tiroirs énoncé sans variable**

*Quand on range des objets dans les tiroirs d'un meuble, le nombre maximum d'objets qu'on trouve dans un tiroir est supérieur ou égal à la moyenne du nombre d'objets qu'on trouve dans les tiroirs.*

Voici un exemple illustrant la puissance de cette variante.

**Problème.** Un jeu de pari sur les résultats de matchs de football vous invite à remplir un carton avec une grille de 13 cases correspondant aux 13 matchs qui seront joués samedi

prochain. Il faut indiquer pour chaque match, A contre B, le résultat que vous anticipez: A gagne, B gagne, ou match nul. Combien de cartons de jeu faut-il remplir et comment faut-il les remplir pour être certain que l'un d'eux comporte au moins cinq prévisions exactes?

**Solution.** Deux cartons ne suffisent pas. En effet, quelle que soit la façon dont vous les remplissez, il se peut que tout soit faux: pour le match X, vous avez choisi une des trois options sur un carton, et peut-être une autre option sur le second carton, mais par malchance, à chaque fois, c'est la troisième option qui s'est réalisée.

Montrons que trois cartons bien remplis vous garantissent d'avoir au moins cinq prévisions exactes sur l'un d'eux.

Vous remplissez au hasard les trois cartons, mais en vous assurant d'indiquer pour chaque match les trois options possibles avec les trois cartons. Comme il y a treize matchs, vos trois cartons feront globalement treize prévisions exactes, puisque pour chaque match vous avez envisagé les trois options possibles.

Considérons que les trois cartons sont les trois tiroirs et que les matchs sont les objets à ranger qu'on place à chaque fois dans le tiroir correspondant au carton qui fait la bonne prédiction. Comme les trois cartons ont fait trois prédictions différentes pour chaque match, chaque match se retrouve dans un tiroir bien précis parmi les trois. Il y a 13 objets, l'un des trois tiroirs contient donc un nombre d'objets supérieur ou égal au nombre moyen d'objets par tiroir. Ce nombre moyen est  $13/3 = 4,33...$  Puisque le nombre d'objets est un entier, l'un

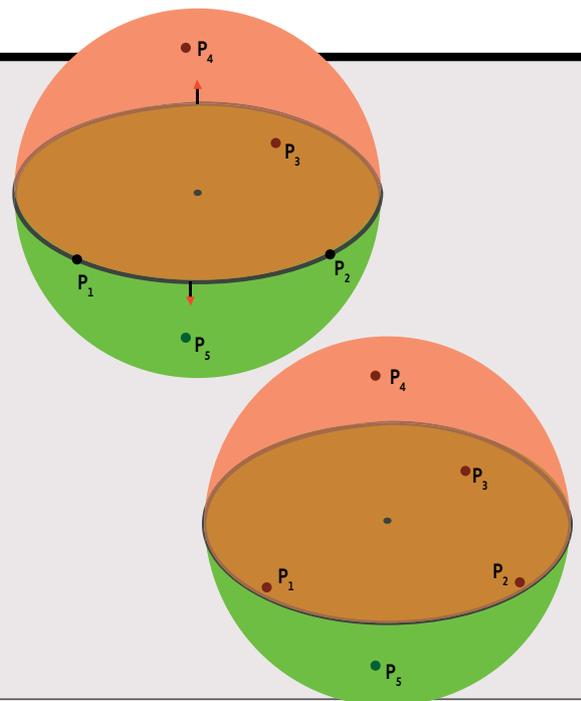
**DÉCOUPAGE D'UNE SPHÈRE**

2

**P**rouver que si l'on dessine 5 points à la surface d'une sphère tels que 2 points ne soient jamais diamétralement opposés, et que 3 d'entre eux n'appartiennent jamais à un même cercle de rayon maximal de la sphère, alors il est possible de découper la sphère en deux demi-sphères dont l'une contient 4 points au moins et cela sans qu'aucun des 4 points ne soit sur le bord de la demi-sphère retenue.

**Solution**

On choisit deux points parmi les cinq,  $P_1$  et  $P_2$ . Ces deux points définissent un grand cercle à la surface de la sphère et donc un découpage en deux demi-sphères. Les trois autres points  $P_3$ ,  $P_4$  et  $P_5$ , se retrouvent sur les deux demi-sphères. Par conséquent, d'après le principe des tiroirs (avec 2 tiroirs et 3 objets), deux des points, mettons  $P_3$  et  $P_4$ , appartiennent à la même demi-sphère. Ces deux points présents sur une même demi-sphère ne sont pas sur le bord du découpage, puisque trois points ne sont jamais sur le même grand cercle. Les deux points qui ont servi à dessiner la découpe sont pour l'instant sur le bord de la découpe, mais ils ne sont pas diamétralement opposés; on peut donc faire légèrement pivoter le grand cercle de découpage pour que les quatre points  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  et  $P_4$  qui nous intéressent soient maintenant sur la même demi-sphère, sans qu'aucun ne soit sur le bord.



des tiroirs contient au moins cinq objets, ou, dit autrement, l'un des cartons comporte au moins cinq prédictions exactes. La conclusion est donc que deux cartons ne permettent rien, mais que trois cartons, bien utilisés, garantissent d'avoir cinq prédictions exactes au moins sur l'un d'eux.

### VARIANTE PROBABILISTE

Le hasard uniforme est un moyen d'améliorer sensiblement le nombre de rencontres dans les tiroirs. On imagine qu'on dispose aléatoirement, avec un hasard uniforme, les  $m$  objets dans les  $n$  tiroirs de notre meuble. Pour opérer le placement au hasard, on utilise par exemple un jeu de  $n$  cartes dont on tire une carte pour chaque objet à placer, carte ensuite remise dans le paquet avant le tirage suivant. Bien sûr, si le nombre  $m$  d'objets est supérieur au nombre  $n$  de tiroirs, la rencontre de deux objets dans un même tiroir est certaine, c'est le principe des tiroirs de base.

Plus intéressant: même s'il y a moins d'objets que de tiroirs ( $m < n$ ), la rencontre se produira assez souvent et bien plus qu'on ne l'imagine *a priori*. Voici l'énoncé du principe probabiliste des tiroirs qui précise cette probabilité.

#### Principe probabiliste des tiroirs

Quand on range uniformément au hasard  $m$  objets dans  $n$  tiroirs ( $m < n$ ) d'un meuble, la probabilité que deux objets se retrouvent dans le même tiroir est égale à  $1 - n!/[n^m(n-m)!]$ , qui vaut à peu près  $1 - \exp[-m(m-1)/2n]$ .

En effet, il y a  $n^m$  tirages possibles puisque  $m$  fois de suite, on tire un des  $n$  tiroirs. Parmi les  $n^m$  tirages possibles, tous équiprobables, le nombre de tirages défavorables (jamais deux objets ne se trouvent dans un même tiroir) est donné par le nombre de suites de  $m$  éléments différents pris parmi  $n$ . On parle d'arrangements, et on sait que leur nombre est  $n!/(n-m)!$ . Le résultat s'en déduit.

Le fameux paradoxe des anniversaires est un cas particulier de ce principe probabiliste. On considère 23 élèves d'une même classe; ce sont les  $m$  objets à ranger! On demande de trouver la probabilité pour que, en les mettant dans 365 tiroirs correspondant aux 365 jours de l'année et pouvant être leur jour anniversaire de naissance, il y en ait deux dans le même tiroir, c'est-à-dire deux élèves ayant le même jour anniversaire. On a  $m=23$  et  $n=365$ ; le calcul fait avec la formule approchée donne:  $1 - \exp[-23 \times 22 / (2 \times 365)] = 0,5000017$ , ce qui est supérieur à 50 %. Avec la formule exacte, le calcul donne: 0,5072972.

Ainsi, la probabilité pour que deux élèves d'une classe de 23 élèves aient le même jour anniversaire est égale à 50,72 %. Notons que dans le monde réel, cette probabilité est un peu supérieure à ce 50,72 %, parce que les >

# 3

## LA DÉMONSTRATION DE DIRICHLET

**M**ême s'il n'en était pas l'inventeur, Dirichlet fut le premier mathématicien à avoir compris la force du principe des tiroirs et à l'avoir utilisé pour démontrer des affirmations intéressantes. Il s'en servit notamment pour établir le résultat suivant : Pour tout nombre réel  $x$  et tout entier donné  $n$ , il existe un nombre rationnel  $p/q$  (un rapport de deux entiers) avec  $q \leq n$ , tel que  $|x - p/q| < 1/(nq)$ . En langage plus simple : on s'intéresse aux nombres rationnels  $p/q$  dont le dénominateur est inférieur ou égal à l'entier  $n$  donné, et on affirme que tout nombre réel peut être approché par l'un d'eux,  $p/q$ , avec une erreur inférieure à  $1/(nq)$ .

#### Démonstration

On ne s'intéresse qu'aux nombres entre 0 et 1, auxquels on se ramène. Pour tout nombre réel  $y$ , notons  $\{y\}$  sa partie fractionnaire, c'est-à-dire ce qui reste quand on lui enlève sa partie entière. Par exemple,  $\{3,14159\} = 0,14159$ . On range les  $n + 1$  nombres 0,  $\{x\}$ ,  $\{2x\}$ , ...,  $\{nx\}$  dans les  $n$  « tiroirs » constitués des intervalles  $[0, 1/n[$ ,  $[1/n, 2/n[$ ,  $[2/n, 3/n[$ , ...,  $[(n-1)/n, 1[$  (rappelons que  $[a, b[$  désigne l'ensemble des nombres  $z$  tels que  $a \leq z < b$ ). D'après le principe des tiroirs, deux de ces  $n + 1$  nombres se

retrouvent dans le même tiroir. Il existe donc deux entiers distincts  $k$  et  $h$  tels que  $\{kx\}$  et  $\{hx\}$  soient dans le même tiroir. On en déduit :  $|\{kx\} - \{hx\}| < 1/n$ . En notant  $p$  la différence des parties entières de  $kx$  et  $hx$ , on en déduit que  $|(k-h)x - p| < 1/n$ . Si l'on pose  $q = k - h$ , et que l'on divise par  $q$  (qui n'est pas nul, car  $k$  est différent de  $h$ ), on obtient :  $|x - p/q| < 1/(nq)$ . CQFD.

Un corollaire du résultat est que pour tout nombre réel  $x$ , il existe une infinité de nombres entiers  $q$  tel que  $|x - p/q| \leq 1/q^2$  pour un certain entier  $p$ . Dans cet énoncé, on ne peut pas remplacer l'exposant 2 par un nombre réel  $a > 2$ . En effet, tout nombre irrationnel algébrique (non rationnel, mais racine d'une équation polynomiale à coefficients entiers) comme le nombre  $\sqrt{2}$  est un contre-exemple. C'est ce qu'indique le théorème suivant, qui contribua à valoir une médaille Fields à Klaus Roth en 1958 : Si  $x$  est irrationnel algébrique et si  $a$  est un nombre réel strictement supérieur à 2, alors il n'existe qu'un nombre fini de  $q$  tels que  $|x - p/q| \leq 1/q^a$  pour un certain entier  $p$  (voir [https://en.wikipedia.org/wiki/Roth's\\_theorem](https://en.wikipedia.org/wiki/Roth's_theorem)).



## PLUS ON EST DE FOUS...

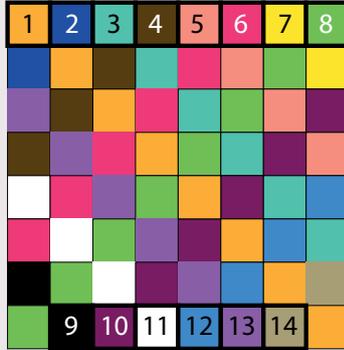
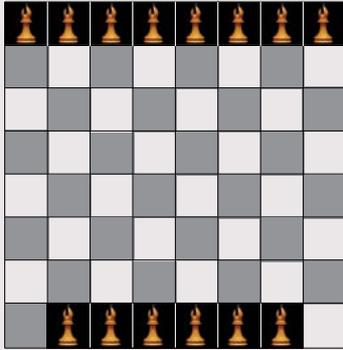
4

**C**ombien de fous du jeu d'échecs peut-on placer au plus sur un échiquier 8 x 8 en évitant que deux fous soient en prise ?

La figure de gauche montre que 14 fous peuvent être placés sans qu'aucun ne soit en prise sur un autre.

La figure de droite montre que l'on ne peut pas en placer plus de 14.

En effet, les couleurs sur l'échiquier définissent 14 sous-ensembles qui seront pour nous 14 tiroirs. On remarque que les couleurs ont été choisies de telle façon que si on place des fous sur deux cases portant la même couleur, ils sont en prise. Il en résulte que si on plaçait  $m$  fous sur l'échiquier avec  $m > 14$ , d'après le principe des tiroirs utilisé avec 14 tiroirs et  $m$  objets, on placerait deux fous dans le même tiroir, donc en prise l'un sur l'autre. Il n'est donc pas possible de placer plus de 14 fous.



## S'ÉCHAPPER DU DAMIER

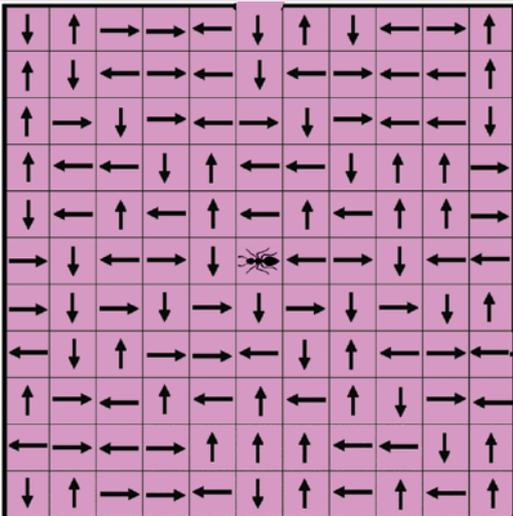
5

**S**ur chaque case d'un damier carré de taille finie, une flèche indique (au hasard) un des quatre points cardinaux. Une fourmi se trouve sur la case centrale. Chaque seconde, elle change de case et va sur la case voisine de sa position en suivant la direction indiquée par la flèche présente sur la case où elle se trouve. Si la fourmi arrive sur la case centrale du mur Nord et que la flèche de la case pointe dans la direction Nord, elle sort. Lorsque la fourmi quitte une case,

la flèche de la case qu'elle vient de quitter tourne de 90° dans le sens des aiguilles d'une montre. Il y a un mur sur les côtés Ouest, Est, Sud et Nord (sauf au niveau de la case centrale du mur Nord). Lorsque la fourmi est bloquée par le mur, elle ne change pas de case, mais la flèche tourne quand même de 90°.

Nous allons montrer que la fourmi finit toujours par trouver la sortie.

Supposons que la fourmi ne quitte jamais le damier. D'après le principe des tiroirs fini/infini, il existe au moins une case où elle passe une infinité de fois (les tiroirs sont les cases, et les objets qu'on y dépose sont les numéros des instants où la fourmi s'y trouve). Comme elle se trouve sur cette case une infinité de fois et qu'elle fait tourner la flèche à chaque passage, elle passe aussi une infinité de fois par chacune de ses voisines. Elle passe donc, de proche en proche, une infinité de fois par chacune des cases. La quatrième fois au plus où elle se trouve sur la case libératrice, la flèche lui indiquera le Nord. C'est contraire à notre hypothèse de départ. La contradiction trouvée prouve qu'il est impossible que la fourmi ne quitte pas le damier.



> naissances ne sont pas uniformément réparties dans l'année, ce qui augmente la probabilité de jours anniversaires communs... et surtout parce que la présence de jumeaux dans une classe, quand elle se produit, fait passer la probabilité calculée à 100 %.

Une autre application du principe probabiliste des tiroirs est amusante. Les humains ont au plus 200 000 cheveux sur la tête. On est donc certain, d'après le principe des tiroirs, que, dans une ville comptant 200 001 habitants ou plus, deux personnes ont exactement le même nombre de cheveux sur la tête. Plus surprenante est la probabilité que cela se produise dans un gros village de 1 000 ou 2 000 habitants. Les calculs avec la formule approchée donnent, pour  $m=1 000$  habitants:

$$1 - \exp[-1 000 \times 999 / (2 \times 200 000)] = 0,9177095, \text{ soit une probabilité de } 91,77 \%, \text{ et pour } m=2 000 \text{ habitants:}$$

$$1 - \exp[-2 000 \times 1 999 / (2 \times 200 000)] = 0,9999543725, \text{ soit une probabilité de } 99,995 \%.$$

Dans un village de 2 000 personnes, il est donc quasiment certain que deux personnes ont, à l'unité près, le même nombre de cheveux!

## DES VERSIONS INFINIES DU PRINCIPE DES TIROIRS

Une chose vraie dans le fini a généralement un énoncé correspondant dans l'infini. C'est le cas pour le principe des tiroirs.

### Principe des tiroirs fini/infini

Quand on range une infinité d'objets dans un nombre fini de tiroirs, l'un des tiroirs contient une infinité d'objets.

Une application de ce principe porte sur les décimales des nombres réels. Parmi les séquences de chiffres décimaux consécutifs de longueur 1 million (il y en a  $10^{1 000 000}$ ), l'une d'elles se retrouve présente une infinité de fois dans les décimales de  $\pi$ ... et c'est vrai en changeant la longueur et en prenant n'importe quel nombre réel à la place de  $\pi$ .

La démonstration est simple. On parcourt les décimales par paquets de 1 million: paquet  $P_1$  commençant à la première décimale, paquet  $P_2$  commençant à la deuxième décimale, etc. Puis on range chaque entier  $n$  dans le tiroir étiqueté par la séquence de décimales  $P_n$ . D'après le principe des tiroirs fini/infini, comme il n'y a que  $10^{1 000 000}$  tiroirs (il n'y a que  $10^{1 000 000}$  séquences distinctes) et qu'on y range tous les entiers, l'un des tiroirs contient une infinité de nombres. La séquence de 1 million de chiffres écrite sur ce tiroir est donc présente une infinité de fois dans les décimales de  $\pi$ .

À vrai dire, on conjecture que «toute séquence finie de chiffres, quelle que soit sa longueur, est présente une infinité de fois dans les décimales de  $\pi$ »; mais contrairement à

# 6

Un champion souhaite organiser ses séances d'entraînement pour les 30 prochains jours. Il s'entraîne par heures entières et veut s'entraîner 45 fois (donc 45 heures). Il veut s'entraîner au moins une heure par jour. Montrer que nécessairement, dans le programme qu'il se fixe, il y a une série de jours consécutifs où il s'entraînera exactement 14 heures.

### Démonstration

Considérons le total des heures qu'il aura fait au bout d'une journée, deux journées, etc. Cela donne 30 nombres entiers  $S_1 < S_2 < \dots < S_{30} = 45$ . On veut démontrer qu'il existe  $i$  et  $j$  tels que  $S_i + 14 = S_j$ . Considérons les inégalités écrites au-dessus

en ajoutant 14 à chaque nombre. On a :  $S_1 + 14 < S_2 + 14 < \dots < S_{30} + 14 = 45 + 14 = 59$ . Les 60 nombres entiers  $S_1, S_2, \dots, S_{30}$  et  $S_1 + 14, S_2 + 14, \dots, S_{30} + 14$  sont tous compris entre 1 et 59. D'après le principe des tiroirs (ici 59 tiroirs, 60 objets), deux de ces nombres, notons-les  $X$  et  $Y$ , sont égaux. Les nombres  $X$  et  $Y$  ne peuvent pas être tous les deux parmi les 30 premiers à cause des inégalités strictes, ni tous les deux parmi les 30 derniers. Il y en a donc un parmi les 30 premiers, disons  $S_i$ , et un autre parmi les 30 derniers, disons  $S_j + 14$ . Nous avons trouvé  $S_i$  et  $S_j$  tels que  $S_i + 14 = S_j$ . C'est ce que nous voulions. Remarquons que le raisonnement marcherait encore en remplaçant 14 par 13 ou 12, ou 11... ou 1.

l'affirmation tirée du principe des tiroirs, cet énoncé plus précis reste une hypothèse.

Le principe des tiroirs fini/infini se généralise en considérant l'algèbre des cardinaux transfinites. Indiquons seulement la version de cette généralisation concernant les ensembles infinis dénombrables, ensembles dont les éléments peuvent être mis en correspondance un à un avec les nombres entiers, et les ensembles infinis non dénombrables, trop gros pour qu'une telle correspondance existe.

### Principe des tiroirs dénombrable/non dénombrable

*Quand on range une infinité non dénombrable d'objets dans un meuble contenant une infinité dénombrable de tiroirs, l'un des tiroirs contient une infinité non dénombrable d'objets.*

**Application.** Si  $E$  est un sous-ensemble non dénombrable du plan et qu'un pavage du plan est donné (par exemple par des carrés) alors l'un des pavés contient une infinité non dénombrable d'éléments de  $E$ . On répartit les points dans des tiroirs correspondant aux pavés qui constituent une infinité dénombrable. Parfois, un point de  $E$  appartient à plusieurs pavés (car les bords des pavés sont communs); on le place alors au hasard dans le tiroir associé à l'un des pavés concernés. Quand tous les points sont placés, on applique le principe des tiroirs: l'un des tiroirs contient donc une infinité non dénombrable d'éléments, et donc l'un des pavés contient une infinité non dénombrable de points de  $E$ .

Le principe des tiroirs fini/infini est important en logique et Terence Tao, célèbre mathématicien australo-américain lauréat d'une médaille Fields en 2006, a proposé un axiome qui exprime ce principe dans un langage logique élémentaire. Cet axiome est aujourd'hui discuté et on étudie sa force (voir la bibliographie). Les travaux autour de ces questions constituent une indication indirecte que les principes des tiroirs sont des

énoncés singuliers exprimant de manière concise des affirmations logiques puissantes... malgré leur apparente évidence.

Ce contenu logique réellement intéressant du principe des tiroirs et de ses variantes est d'ailleurs confirmé par d'autres travaux menés en démonstration automatique à propos d'une méthode de calcul logique dénommée *résolution*. On étudie la transcription en logique propositionnelle de l'affirmation: si  $m$  objets sont mis dans  $n$  tiroirs et que  $m > n$ , alors l'un des tiroirs contient au moins deux objets. On essaie de voir quelles sont les démonstrations les plus courtes possible de la formule. On découvre qu'elles sont toutes assez longues, ce qui confirme que, même si elles nous apparaissent aller de soi, les affirmations tirées du principe des tiroirs quand on fait varier  $n$  et  $m$  ne résultent pas sans efforts des vérités logiques élémentaires adoptées comme axiomes.

### UN PRINCIPE FAUX EN MÉCANIQUE QUANTIQUE?

Une dernière preuve que ces principes ne sont pas uniquement des banalités vient d'être proposée par Yakir Aharonov, de l'université de Tel Aviv, et des collègues. Leur article paru en 2016 dans la revue de l'Académie des sciences des États-Unis affirme établir que la forme la plus élémentaire du principe des tiroirs, «Si trois objets sont placés dans deux tiroirs, alors l'un des tiroirs contient deux objets», est fautive en mécanique quantique.

Si comme moi vous avez du mal à comprendre l'article (voir la bibliographie), qui a provoqué quelques réactions critiques, et à savoir ce que peut signifier qu'en mécanique quantique le principe des tiroirs soit faux, ce n'est pas très étonnant. Après tout, le grand physicien américain Richard Feynman avait lui-même déclaré que «personne ne comprend la mécanique quantique»! ■

## BIBLIOGRAPHIE

Y. Aharonov et al., **Quantum violation of the pigeonhole principle and the nature of quantum correlations**, *PNAS*, vol. 113(3), pp. 532-535, 2016.

B. Rittaud et A. Heeffer, **The pigeonhole principle, two centuries before Dirichlet**, *The Mathematical Intelligencer*, vol. 36, pp. 27-29, 2014.

O. Beyersdorff et al., **A lower bound for the pigeonhole principle in tree-like resolution by asymmetric Prover-Delayer games**, *Information Processing Letters*, vol. 110(23), pp. 1074-1077, 2010.

J. Gaspar et U. Kohlenbach, **On Tao's "finitary" infinite pigeonhole principle**, *The Journal of Symbolic Logic*, vol. 75(1), pp. 355-371, 2010.

P. G. L. Dirichlet, **Recherches sur les formes quadratiques à coefficients complexes**, *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, vol. 24, pp. 291-371, 1842.



Le tableau *La Pose enchantée* (en haut, avec des couleurs reconstituées), de Magritte, n'existe plus. L'artiste l'a découpé et en a réemployé les morceaux pour réaliser d'autres œuvres. La radiographie (ci-dessus) a révélé que le quart supérieur droit se dissimulait sous *Dieu n'est pas un saint* (ci-contre). C'est le dernier fragment qui manquait.

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN  
rédacteur en chef adjoint  
à Pour la Science

# CECI N'EST PAS UN PUZZLE

Grâce à la radiographie,  
on a retrouvé le dernier  
fragment d'une toile  
de Magritte que le peintre  
avait découpée en  
quatre pour en faire  
de nouvelles œuvres.

# E

n 1929, la crise venue des États-Unis débarque en Europe. Parmi ceux qu'elle a considérablement appauvris, on compte le peintre belge René Magritte. Il a quitté deux ans auparavant son pays pour Paris, où il a fréquenté les surréalistes (André Breton, Paul Éluard, Max Ernst...), mais il est contraint de rentrer, désargenté, à Bruxelles en 1930. En particulier, il est privé du soutien financier de la galerie bruxelloise Le Centaure, qui a fermé.

S'ouvre alors une période de vaches maigres qui durera plusieurs années. Pour s'adonner à son art, il est conduit à des actes extrêmes. C'est ainsi qu'il découpe en quatre morceaux l'une de ses toiles, *La Pose enchantée*, peinte en 1927 (voir page ci-contre). On connaît ces deux femmes nues accoudées sur des colonnes brisées grâce à une photographie, en noir et blanc, qui figure dans le *Catalogue raisonné* de l'artiste avec la mention: «Localisation inconnue [...] probablement détruite.» Que sont devenus les fragments?

La découverte de la dernière pièce du puzzle a été annoncée en novembre 2017

par une équipe conjointe des musées royaux des Beaux-Arts de Belgique et le Centre européen d'archéométrie de l'université de Liège. Reprenons l'enquête depuis le début.

## ÉPARILLÉ PAR PETITS BOUTS

La première pièce, le tableau intitulé *Le Portrait*, peint en 1935, a été repéré en 2013 par Anne Umland et Michael Duffy, du musée d'Art moderne de New York, alors qu'ils préparaient une exposition. En remarquant qu'une autre œuvre se cachait sous celle visible, ils ont radiographié la toile: les rayons X ont révélé qu'il s'agissait du quart supérieur gauche de *La Pose enchantée*.

Encouragée par ce premier succès, la même équipe a pisté les toiles dont les dimensions pouvaient correspondre aux œuvres recherchées et a sondé la face cachée du *Modèle rouge*, peint en 1935 et conservé au musée Moderna, à Stockholm, en Suède. Gagné! C'était le quart inférieur gauche.

D'autres limiers ont ensuite pris le relais. Leur traque les a menés dans un musée de Norfolk, en Grande-Bretagne. Cette fois, en 2016, la radiographie mit en évidence le quart inférieur droit du tableau original sous *La Condition humaine*, elle aussi réalisée en 1935. Un seul morceau restait à trouver...

C'est là qu'entre en scène le projet *Magritte on practice*, qui a consisté à étudier chaque toile du musée Magritte, à Bruxelles, la plus vaste collection

d'œuvres de l'artiste. La pièce manquante était bien à Bruxelles, dissimulée sous les traits de *Dieu n'est pas un saint*, daté entre 1935 et 1936. La mission était accomplie et le dossier classé: *La Pose enchantée* était entièrement reconstituée.

On remarque que le réemploi des morceaux a attendu au moins cinq années. On peut y voir le signe d'une hésitation, Magritte ayant peut-être eu du mal à se résoudre à ce sacrifice. Y en a-t-il eu d'autres? Probablement, car certains spécialistes prêtent au peintre la fâcheuse habitude de recycler ses toiles.

Un autre indice vient du *Catalogue raisonné*, où de nombreux tableaux portent la mention «Localisation inconnue». Sont-ils là, sous nos yeux, et surtout sous d'autres couches de peintures?

Francisca Vandepitte, des musées royaux des Beaux-Arts de Belgique, le pense: «Si nous avons la possibilité de poursuivre ces recherches, il y a tout lieu de s'attendre à ce que d'autres tableaux disparus de Magritte fassent surface.»

Les 42 huiles et 21 gouaches que l'on connaît de l'artiste ne seraient alors que la face visible d'une œuvre beaucoup plus vaste. Les expositions dédiées à Magritte seront désormais multicouches! ■

Le communiqué de l'université de Liège:  
<http://bit.ly/PLS-Magritte>



Retrouvez la rubrique  
Art & science sur  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

## LES AUTEURS



**JEAN-MICHEL COURTY**  
professeur de physique  
à l'université  
Pierre-et-Marie-Curie,  
à Paris



**ÉDOUARD KIERLIK**  
également professeur  
de physique à l'université  
Pierre-et-Marie-Curie

# DES PENDULES DE FOUCAULT SUR PUCE

**Pour mesurer les rotations d'un appareil, les gyromètres électromécaniques s'appuient sur la force de Coriolis - la même force qui permet au pendule de Foucault de mettre en évidence la rotation de la Terre sur elle-même.**

**Q**uel est le point commun entre un smartphone, une manette de jeu vidéo, un drone à quatre hélices, une automobile ou un gyropode? Chacun de ces objets dissimule un minuscule gyromètre: une puce électromécanique de taille millimétrique qui mesure en temps réel la vitesse de rotation de l'objet et qui peut, par intégration temporelle, en déduire son orientation dans l'espace, étape indispensable pour stabiliser celle-ci.

Malgré leur modernité, ces dispositifs s'inspirent d'instruments et de principes connus au XIX<sup>e</sup> siècle. Voyons lesquels et ce qu'il y a de nouveau.

## S'ORIENTER À L'AVEUGLE

Pouvons-nous déterminer notre orientation dans l'espace et son évolution en l'absence de toute référence extérieure, par exemple dans une cabine de train dont

les volets sont baissés ou dans un avion en plein brouillard? Nous serions tentés de répondre oui. Lorsque nous sommes en voiture, nous savons même les yeux fermés que la voiture accélère parce que nous sommes collés contre le dossier du siège, et que nous tournons parce que nous sommes déportés sur le côté. Ces forces ressenties sont des forces d'inertie, mesurables par des dynamomètres ou par l'inclinaison d'un fil à plomb.

Cependant, la mesure de ces forces ne permet pas toujours d'en déduire notre orientation. Un exemple? Lorsqu'un avion exécute un virage, le pilote incline l'avion, afin que la force ressentie par les passagers reste toujours selon la verticale du plancher. Avec un dynamomètre, on mesurerait une accélération supérieure à l'accélération de la pesanteur; mais il en serait de même si l'avion suivait une trajectoire incurvée vers le haut.

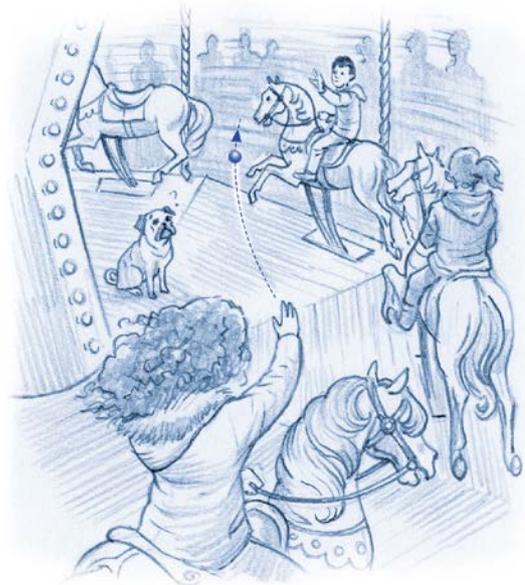
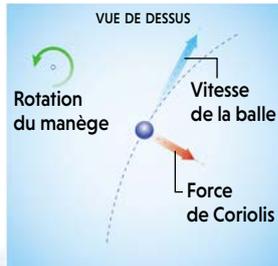
Le physicien français Léon Foucault a proposé deux solutions à cette difficulté.



La première tourne et la seconde oscille. La solution tournante, c'est le gyroscope, qu'il a perfectionné en 1852. Grâce à une suspension adaptée, une masse en rotation très rapide autour d'un axe est libre de pivoter dans toutes les directions. Dans ces conditions, l'axe conserve sa direction quels que soient les mouvements de la suspension, solidaire de l'objet en mouvement, l'avion dans notre exemple. Un ensemble de gyroscopes permet ainsi de déterminer à chaque instant l'orientation de la cabine. Ce dispositif a longtemps été au service des aviateurs, mais son efficacité avait un prix: un poids et un encombrement notables, problème que n'a pas

## LA FORCE DE CORIOLIS

**D**ans un référentiel en rotation, une masse  $m$  en mouvement subit une force dite de Coriolis perpendiculaire à l'axe de rotation du système et à la vitesse de la masse. Plus précisément, cette force est égale à  $2m$  fois le produit vectoriel du vecteur vitesse par le vecteur rotation (vecteur dirigé selon l'axe de rotation et de norme égale à la vitesse angulaire). Ainsi, dans le manège qui tourne ici dans le sens antihoraire, la trajectoire de la balle est déviée vers la droite. Vue d'un observateur extérieur au manège, c'est-à-dire dans le référentiel « fixe », la trajectoire est normale : pour cet observateur, la balle reste dans un même plan vertical.



Assistance à la tenue de route, stabilisation des prises de vue, jeux vidéo sur téléphone, navigation des avions... : les gyromètres sont omniprésents.

Ce sont ces deux caractéristiques (proportionnalité et orthogonalité de la force de Coriolis) qui sont à l'œuvre dans les gyromètres modernes. Pour obtenir des vitesses de déplacement suffisantes dans un espace limité, le système oscillant n'est plus un pendule, mais un système qui vibre à haute fréquence. Cela se prête bien aujourd'hui à la miniaturisation avec les systèmes microélectromécaniques (MEMS), fabriqués à l'aide des techniques de gravure et de lithographie développées pour l'électronique. Les gyromètres de nos téléphones tiennent ainsi dans une boîte de quelques millimètres de côté et de un millimètre d'épaisseur.

Un tel gyromètre est constitué de plusieurs composants similaires où sont >

entièrement résolu le passage à des systèmes optiques (gyromètres à fibre optique, ou gyrolasers).

### MESURER LES ROTATIONS GRÂCE À LA FORCE DE CORIOLIS

La solution oscillante est le « pendule de Foucault », qui met en évidence la rotation de la Terre sur elle-même. Il met à profit la force de Coriolis, une force d'inertie qui agit sur les objets en mouvement (ici la masse du pendule) dans un référentiel en rotation (ici la Terre). Cette force, perpendiculaire à la fois à l'axe de rotation du référentiel et à la vitesse de l'objet, est proportionnelle au produit de cette

dernière par la vitesse angulaire. Dans le cas de la rotation de la Terre sur elle-même, son intensité est faible : de l'ordre du millième du poids pour un objet qui se déplace à 250 kilomètres par heure. Cependant, ses effets sont notables lorsqu'ils se cumulent sur une assez longue durée.

C'est le cas avec des phénomènes atmosphériques tels que les anticyclones et les dépressions, ou avec le pendule de Foucault. À chaque oscillation, la masse suspendue est légèrement déviée sur sa droite par rapport à sa trajectoire ; son plan d'oscillation tourne ainsi peu à peu, à une vitesse angulaire proportionnelle à celle de la Terre.

Les auteurs ont récemment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> gravés, dans du silicium massif, les éléments mécaniques, certains recouverts d'or pour conduire l'électricité. Ces éléments sont rattachés au support (et *in fine* à l'objet en mouvement) par de petites tiges faisant office de ressorts.

Chaque composant comporte une masse pilote et une masse d'épreuve (voir *ci-contre*). Le pilote, directement attaché au support, est conçu pour vibrer selon un seul axe, notons-le X. Cette vibration est excitée électriquement par des électrodes, et est très peu sensible au mouvement de l'objet. La masse d'épreuve, elle, est attachée (*via* des tiges-ressorts) au pilote de façon à pouvoir vibrer selon un axe perpendiculaire (qu'on notera Y) à celui des vibrations du pilote.

### FORCE DE CORIOLIS SUR UN MOUVEMENT VIBRATOIRE

En l'absence de rotation, le pilote entraîne la masse d'épreuve dans son mouvement d'oscillation selon X, sans autre effet supplémentaire. Mais si l'objet est en rotation autour de l'axe Z perpendiculaire aux deux premiers, le pilote comme la masse d'épreuve, tous les deux en mouvement à cause des vibrations imposées selon X, subissent une force de Coriolis selon Y.

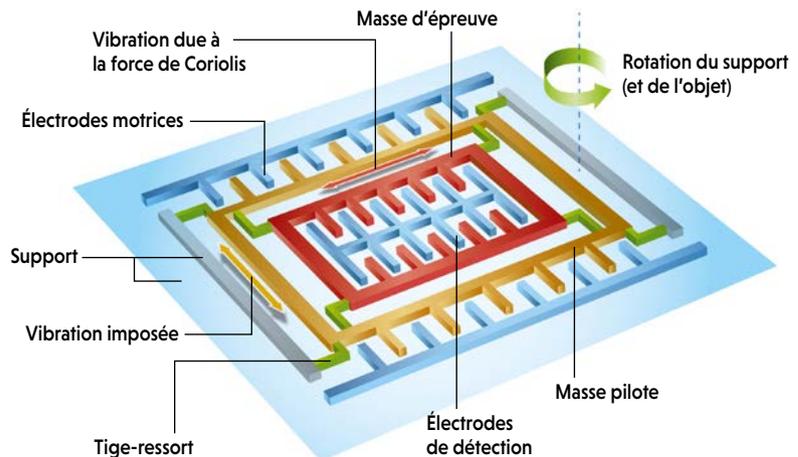
Cette force de Coriolis est sans effet sur le pilote, contraint à se mouvoir selon X. En revanche, la masse d'épreuve, libre de vibrer dans la direction Y, se met à osciller avec une amplitude proportionnelle à celle de la force (ici périodique) de Coriolis, elle-même proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation. L'amplitude de l'oscillation de la masse d'épreuve est mesurée grâce aux propriétés électriques du condensateur formé par cette masse et des électrodes fixées au support. Et de cette amplitude, on déduit la vitesse angulaire de rotation.

Les fréquences de vibration utilisées sont d'habitude comprises entre 10 kilohertz et 1 mégahertz, avec une sensibilité qui atteint aujourd'hui 0,01 degré par seconde par racine de hertz (c'est-à-dire qu'en mesurant durant une seconde, on a une sensibilité de 0,01 degré par seconde sur la vitesse angulaire).

Et si la rotation s'effectue autour d'un autre axe que Z? Cette éventualité est évidemment à prendre en compte puisqu'on ignore *a priori* selon quel axe s'effectue la rotation; de plus, cet axe peut varier au cours du temps. C'est pourquoi un gyromètre complet est composé de plusieurs dispositifs, dont les pilotes ont des directions de vibration distinctes. En combinant

## MICROGYROMÈTRE ÉLECTROMÉCANIQUE

**L**e dispositif de base des microgyromètres est le plus souvent constitué d'une masse pilote qui effectue des vibrations imposées selon une direction et qui entraîne une masse d'épreuve ne pouvant se déplacer, par rapport au pilote, que dans une direction perpendiculaire. S'il y a rotation, la masse d'épreuve subit alors une force de Coriolis périodique qui la fait vibrer selon cette direction. L'excitation des vibrations pilotes et la détection des vibrations de la masse d'épreuve sont réalisées au moyen d'électrodes, le déplacement de la masse par rapport aux électrodes modifiant la capacité électrique du système masse-électrodes.



les signaux fournis par chacun des composants du gyromètre, on détermine alors la vitesse de rotation et son axe.

De plus, pour améliorer la sensibilité du système et éliminer l'effet des mouvements parasites, on peut associer deux composants dont les pilotes vibrent selon la même direction, mais en opposition de phase. Un mouvement de translation agira alors de la même façon sur les deux dispositifs, contrairement à un mouvement de rotation.

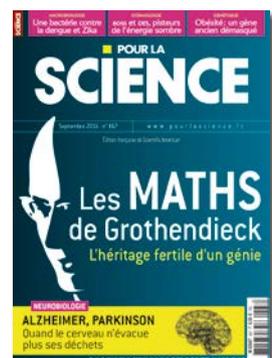
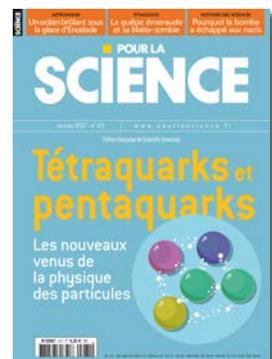
En pratique, il existe de nombreuses conceptions différentes de ces gyromètres miniatures, certaines permettant par exemple la mesure directe des variations d'angle, et non pas de la vitesse angulaire. Cette variété accroît encore la polyvalence de ces dispositifs.

En permettant de mesurer avec précision l'orientation de l'objet dans l'espace, les microgyromètres sont ainsi au cœur de tous les mécanismes de stabilisation et de contrôle actif, qu'il s'agisse des caméras, de l'assistance à la tenue de route pour les voitures, de l'équilibre des gyropodes ou de celui des drones multihélices. Par exemple, si les hélices d'un drone n'exercent pas exactement la même force verticale, l'appareil s'incline immédiatement et se précipite vers le sol. Une déstabilisation si rapide que, en l'absence d'asservissement, le pilote n'aurait pas le temps de réagir. ■

### BIBLIOGRAPHIE

V. M. N. Passaro et al.,  
**Gyroscope technology and applications : A review in the industrial perspective**, *Sensors*, vol. 17(10), article 2284, 2017.

# DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE **POUR LA SCIENCE**



RETROUVEZ TOUS  
LES NUMÉROS  
DEPUIS 1996

COMPLÉTEZ  
VOTRE COLLECTION  
SUR [www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)



## LES AUTEURS



SÉBASTIEN STEYER  
paléontologue  
au CNRS-MNHN



ROLAND LEHOUCQ  
astrophysicien  
au CEA, à Saclay

# MAGNÉTO, MAÎTRE DU CHAMP MAGNÉTIQUE

**Ce superhéros est capable de créer et de manipuler des champs magnétiques. Il n'en a cependant pas l'exclusivité: un grand nombre de techniques et d'instruments, des disques durs des ordinateurs à l'imagerie médicale, en exploitent les propriétés.**

« **L'**humanité a toujours eu peur de ce qu'elle ne connaissait pas. » Les bras croisés et le regard sévère, il s'avance lentement dans les airs, arborant un casque de métal et une combinaison sombre: c'est Magnéto, l'un des plus puissants mutants de l'univers de Marvel Comics, éditeur américain de bandes dessinées de superhéros.

Les paroles de Magnéto, si elles font référence à son statut de mutant, pourraient tout aussi bien s'appliquer au champ magnétique qu'il manipule avec aisance. En effet, si le magnétisme est connu depuis l'Antiquité, on n'a compris le phénomène qu'au cours des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles. Encore aujourd'hui, le champ magnétique suscite parfois des angoisses ou des polémiques, à l'image des conséquences de l'inversion du champ magnétique terrestre.

Revenons sur ce phénomène physique qui est au cœur du fonctionnement de nombreux objets de notre quotidien ou de dispositifs plus rares: moteurs électriques, plaques à induction, disques durs, imagerie par résonance magnétique, trains à sustentation magnétique, électro-aimants tels que ceux utilisés dans les accélérateurs de particules, etc.

Mais qui est Magnéto? Imaginé par Stan Lee et Jack Kirby, pères de nombreux autres superhéros (comme Spiderman), Magnéto – alias Max Eisenhardt – apparaît pour la première fois en 1963 dans le premier numéro de *The Uncanny X-men*, une série mettant en scène des mutants doués de superpouvoirs. Rappelons que, dans le monde réel, un mutant est un individu présentant une modification accidentelle ou provoquée de son génome. Une mutation n'est pas toujours visible au niveau du morphotype, l'aspect extérieur de >



Magnéto est un supervilain capable de créer et manipuler des champs magnétiques pour déplacer des objets. Ici, on voit des débris s'aligner sur les lignes du champ magnétique à la façon de la limaille de fer en présence d'un aimant.

> l'individu. C'est le cas de Magnéto, qui ressemble à un humain ordinaire. Sa mutation ne change rien à son apparence, mais elle lui confère un superpouvoir: la capacité de créer de puissants champs magnétiques pour déplacer, faire léviter ou déformer à volonté divers objets, notamment ceux en fer ou en acier.

Sa biographie fictive, particulièrement soignée, nous apprend que ce personnage sensible, né juif polonais en 1926, est un rescapé des camps de concentration nazis. Son superpouvoir s'est exprimé pour la première fois sous le stress et la terreur lorsque, enfant, les nazis l'arrachèrent à sa mère: par la seule action de son esprit, il réussit alors à tordre avec facilité le portail métallique du camp de concentration.

### UN POUVOIR SOUS CONTRÔLE

En sciences de la vie, une mutation dont les effets ne s'expriment que dans certaines situations est dite conditionnelle. Les facteurs qui déclenchent l'expression de ce type de mutation sont variés; ils peuvent être soit intrinsèques (par exemple une variation d'un autre gène, alors qualifié de modificateur), soit extrinsèques (par exemple des variations des conditions environnementales telles que la température). Si la mutation de Magnéto est conditionnelle, celui-ci a appris à contrôler son superpouvoir par la concentration, ce qui en fait rapidement un personnage très puissant. Mais, incompris et pourchassé par des humains qui le considèrent comme un danger potentiel, Magnéto répond par la violence... et utilise effectivement son superpouvoir comme une arme!

Le magnétisme est une propriété que, depuis l'Antiquité jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle, on a associée aux aimants et à certains minerais riches en magnétite. La boussole en a été le symbole et l'application la plus célèbre. En 1820, le physicien danois Hans Christian

Ørsted a montré que l'aiguille d'une boussole est déviée par un courant électrique parcourant un fil à proximité. En 1831, le physicien britannique Michael Faraday en a donné l'explication en énonçant une loi qui lie électricité et magnétisme. Trente ans plus tard, le physicien écossais James Clerk Maxwell exposera une théorie cohérente de l'électromagnétisme, où l'électricité et le magnétisme sont deux facettes d'un phénomène plus fondamental, le champ électromagnétique. Dans le langage des mathématiques, le champ magnétique est une quantité vectorielle, c'est-à-dire définie par une direction, un sens et une intensité dont l'unité internationale est le tesla, choisie en l'honneur de l'ingénieur d'origine serbe Nikola Tesla (1856-1943), notamment inventeur de l'alternateur électrique.

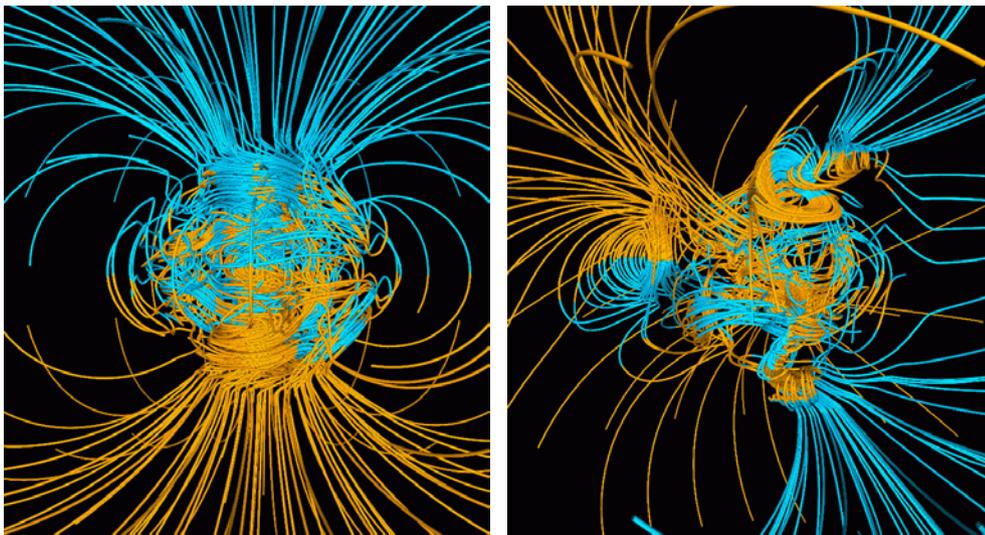
Les sources de champ magnétique sont de diverses natures: les aimants permanents (du fait d'une direction privilégiée du moment magnétique des atomes du matériau), le déplacement des charges électriques (le courant!) ou la variation temporelle d'un champ électrique (phénomène d'induction magnétique). Le spectre des intensités magnétiques est très vaste. Il va de quelques milliteslas pour le petit «magnet» qui tient la liste des courses sur la porte de votre réfrigérateur à 100 gigateslas pour certaines étoiles à neutrons – nommées pour l'occasion *magnetic stars* ou magnétars – en passant par les quelques teslas de l'électroaimant de votre enceinte haute-fidélité.

Grâce à son superpouvoir, Magnéto a vite compris qu'il pouvait manipuler une grande gamme de matériaux, à commencer par le fer et ses dérivés. Dans le film *X-Men 2* (Bryan Singer, 2003), pour s'échapper de sa prison de plastique haute sécurité, il extrait le fer du sang d'un gardien afin d'en faire de petites billes qu'il propulse à la vitesse de balles de fusil. Si l'hémoglobine contient effectivement des atomes de fer, l'accumulation anormale de

### SUR LE WEB

Pour voir une expérience d'extraction du fer contenu dans vos céréales préférées : [http://bit.ly/PLS483\\_SF1](http://bit.ly/PLS483_SF1)

Pour voir Magnéto extraire le fer du sang du gardien de prison et s'échapper (âmes sensibles s'abstenir) : [http://bit.ly/PLS483\\_SF2](http://bit.ly/PLS483_SF2)



Le champ magnétique terrestre est produit par un effet dynamo dû aux mouvements de convection du fer dans la partie liquide du noyau de la planète. Ces simulations ont été réalisées par Gary Glatzmaier, de l'université de Californie à Santa Cruz, et Paul Roberts, de l'université de Californie à Los Angeles, d'après leur modèle qui décrit la géodynamo. Dans la situation actuelle (à gauche), le champ magnétique est relativement régulier et comparable à un aimant géant doté de deux pôles bien définis. Lors de l'inversion du champ magnétique (à droite), la structure du champ magnétique devient chaotique.

ce métal dans les tissus se nomme «hémossidérose» (du grec *haima*, le sang et *sideras*, le fer). Cette pathologie touchant diverses espèces est soit accidentelle (comme chez certains canards qui sont la cible de chasseurs utilisant de la grenaille alternative au plomb), soit héréditaire (chez l'humain, elle est fréquente, mais pas toujours bien diagnostiquée). Elle est alors due à un dérèglement des cellules (les macrophages) censées digérer le fer de l'hémoglobine, lequel se retrouve stocké dans divers organes (pancréas, cœur, foie); cette accumulation peut provoquer de graves lésions et autres symptômes tels que fibroses ou nécroses.

Dans le film *X-Men: l'Affrontement final* (Brett Ratner, 2006), Magnéto cherche à libérer d'autres mutants prisonniers sur l'île d'Alcatraz. Pour ce faire, il arrache et transporte dans les airs le pont du Golden Gate de San Francisco, énorme structure d'environ 900 000 tonnes au total (dont 75 000 tonnes d'acier)!

A priori, tous les matériaux sont, à des degrés divers, sensibles à un champ magnétique. Cette sensibilité est caractérisée par une grandeur nommée susceptibilité magnétique, qui quantifie la faculté du matériau à s'aimanter sous l'action d'un champ magnétique externe. Les matériaux dont la susceptibilité est positive sont dits paramagnétiques (l'aimantation est dans le même sens que le champ externe); ceux dont la susceptibilité est négative sont dits diamagnétiques. Les corps paramagnétiques ayant une susceptibilité élevée sont nommés ferromagnétiques. Ce sont les plus sensibles à l'action d'un champ magnétique et certains tels le fer, le cobalt et le nickel, sont capables de conserver leur aimantation même en l'absence de champ magnétique: ils servent à fabriquer des aimants permanents.

### FAIRE VOLER DES PONTS ET LÉVITER DES GRENOUILLES

L'aimantation induite par le champ magnétique s'accompagne aussi de l'apparition d'une force mécanique du champ sur le matériau. Cette force est proportionnelle à la variation spatiale – ou gradient – du carré de l'intensité du champ magnétique. Autrement dit, ce n'est pas l'intensité du champ qui compte, mais la façon dont il varie dans l'espace. Pour manipuler le pont du Golden Gate, Magnéto doit donc créer un champ dont le gradient est élevé, et sa tâche est facilitée par le fait que la structure métallique du pont est ferromagnétique. La force résultante est dirigée vers l'endroit où le champ magnétique est le plus intense (sans doute Magnéto lui-même!), la susceptibilité d'un matériau ferromagnétique étant positive.

Si le champ magnétique agit sur un diamagnétique, la lévitation magnétique stable est

## Le champ magnétique terrestre s'est inversé près de 300 fois depuis 200 millions d'années

possible. Dans ce cas, la force magnétique est dirigée vers les zones où le champ magnétique est le moins intense, la susceptibilité d'un diamagnétique étant négative. Le carbone pyrolytique, matériau artificiel voisin du graphite, a l'une des plus grandes susceptibilités diamagnétiques connues et lévite facilement au-dessus d'aimants permanents commerciaux. Mais l'idéal est de disposer d'un matériau supraconducteur, dont la susceptibilité magnétique négative est égale à  $-1$  (de l'ordre de 100 000 fois celle du carbone pyrolytique). C'est ainsi que fonctionnent les trains à lévitation magnétique, dont seulement six lignes sont actuellement en fonction, pour une longueur cumulée de 70 kilomètres.

En 1997, les physiciens néerlandais Andre Geim et britannique Michael Berry ont utilisé la lévitation diamagnétique sur une petite grenouille vivante, sans dommage pour elle, en la plaçant dans un important gradient de champ magnétique. Ce champ agit sur le diamagnétique naturel qu'est l'eau contenue dans les tissus; il crée une force globale et homogène sur l'animal. Pour cette expérience spectaculaire, les deux chercheurs ont reçu le parodique prix Ig Nobel de physique en 2000 (Andre Geim a aussi obtenu le prix Nobel en 2010 pour l'obtention du graphène et son étude!). Magnéto peut donc tout à fait soulever des organismes vivants, voire appliquer son superpouvoir à lui-même pour léviter tranquillement dans les airs.

Capable de manipuler les champs magnétiques dans l'espace et dans le temps, Magnéto est donc incontestablement redoutable. Persécuté durant son enfance, il refuse de se plier aux règles dictées par les humains qui considèrent les mutants comme des individus malades et dangereux. S'opposant alors à son ami Charles Xavier, mutant aux puissants pouvoirs mentaux et partisan d'une cohabitation pacifique avec les humains, Magnéto menace l'humanité d'inverser la polarité du champ magnétique terrestre. Il sera finalement neutralisé par les X-men. >

➤ L'intensité du champ magnétique terrestre est comprise entre 25 et 65 millièmes de teslas, selon l'endroit où on le mesure. D'après les modèles des géophysiciens, ce champ géomagnétique serait engendré par des courants de convection du fer et du nickel liquides présents dans le noyau externe de la Terre, à une profondeur comprise entre 3400 et 1220 kilomètres et où la température varie de 5700 °C à 3500 °C environ.

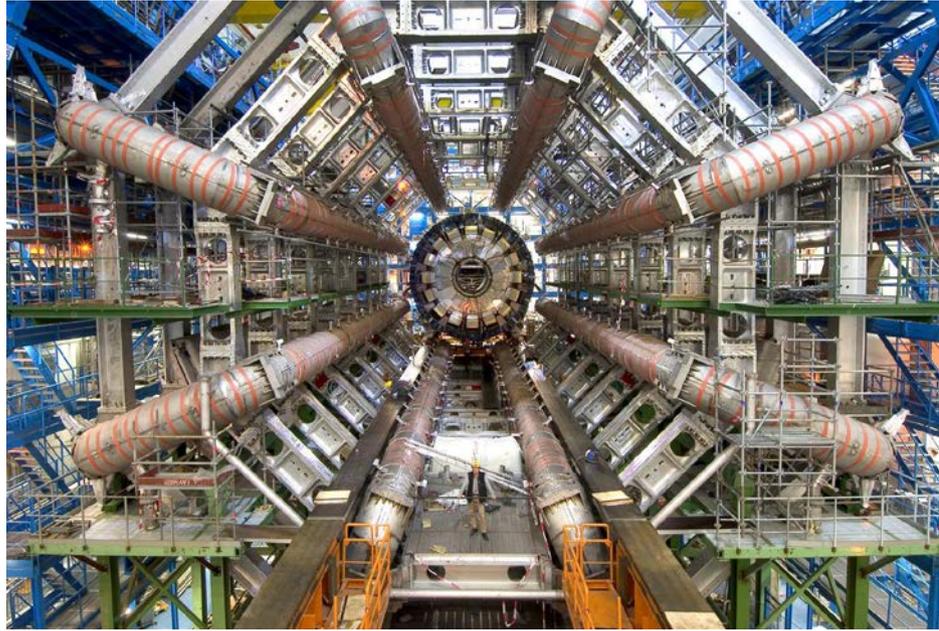
Schématiquement, on peut alors comparer la Terre à une sorte d'aimant géant dont l'axe des pôles magnétiques est incliné d'environ 11 degrés par rapport à son axe de rotation. Les lignes de champ de cet aimant tellurique géant émanent du pôle magnétique nord (actuellement situé non loin du pôle Sud géographique) et reviennent au pôle magnétique sud en dessinant ce que les spécialistes nomment la magnétosphère, dont la planète est enveloppée. Côté Soleil, cette magnétosphère est plus aplatie que du côté opposé où elle adopte une forme évoquant une queue de comète. La déformation de la magnétosphère du côté Soleil résulte de la pression exercée par le vent solaire. Ce flux de particules très rapides (200 à 1000 kilomètres par seconde) émises par l'étoile est une réelle menace pour les organismes vivants à la surface de la Terre, et la magnétosphère nous en protège, avec l'atmosphère.

### LA COLÈRE DU SOLEIL

Plus dangereuses que le vent solaire, les « tempêtes solaires » sont des éruptions de matière solaire particulièrement intenses qui, malgré la magnétosphère, menacent les astronautes mais aussi les pilotes de ligne qui passent de nombreuses heures en haute altitude. Ces éruptions solaires peuvent aussi gravement perturber les appareils électroniques aussi bien en orbite (satellite, station spatiale) qu'en vol (avion, drone) ou même au sol (une panne massive du réseau électrique au Canada en 1989 a été provoquée par une telle tempête).

Si Magnéto inversait le champ magnétique terrestre, il annulerait les effets de la magnétosphère pendant un certain temps. Cela provoquerait une érosion partielle de l'atmosphère par le vent solaire. Des particules de haute énergie, mutagènes voire létales, pourraient atteindre la surface. Le supervillain serait alors à la fois maître du monde et seul au monde...

En fait, l'inversion du champ magnétique terrestre s'est déjà produite près de 300 fois durant ces 200 millions d'années passées! Ces inversions naturelles du champ géomagnétique ne sont pas périodiques et seraient dues à des irrégularités de convection ou à des instabilités dynamiques du noyau terrestre (voir les figures de la page 88). Elles ont pour effet de perturber



la magnétosphère. Ces inversions pourraient donc avoir un effet sur l'évolution de la biodiversité, soumise au bombardement de particules de haute énergie, au cours des temps géologiques. Mais elles ne semblent pas corrélées avec les extinctions massives d'espèces qu'a connues la Terre.

La magnétosphère qui protège la vie sur Terre n'est pas propre à notre planète: Jupiter, par exemple, présente aussi une magnétosphère – qui est d'ailleurs considérablement plus importante que celle de la Terre – alors que d'autres corps célestes n'en ont pas ou plus, telle la planète Mars. En exobiologie, la présence d'un bouclier magnétosphérique est parfois considérée comme nécessaire, voire obligatoire, pour faciliter l'apparition de formes de vie à la surface d'une planète. C'est cependant oublier qu'une croûte de glace épaisse comme celle d'Europe ou d'Encelade – des lunes glacées de Jupiter et de Saturne – peut aussi faire office de bouclier. Si une vie existe sur ces petits corps, elle est protégée du vent solaire et du rayonnement cosmique par une épaisse couche de glace, et non par une magnétosphère (et une atmosphère).

Notons pour finir que le champ magnétique terrestre a un autre intérêt pour de nombreuses espèces, qui s'y fient pour se déplacer, s'orienter ou encore se reproduire. C'est le cas des oiseaux migrateurs, des baleines, des abeilles, mais aussi de bactéries dites magnéto-tactiques, qui suivent les lignes de champ magnétique pour se mouvoir. Ces bactéries sécrètent des magnétosomes, organites contenant des nanocristaux ferromagnétiques (greigite,  $\text{Fe}_3\text{S}_4$ , et magnétite,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Comme Magnéto, le champ magnétique a plus d'un tour dans son sac. ■

Le détecteur *Atlas* du LHC, au Cern, comprend deux systèmes qui produisent des champs magnétiques. Sur ce cliché pris pendant la construction du dispositif, on distingue les huit éléments du champ magnétique toroidal externe. Il s'agit d'électroaimants supraconducteurs qui créent un champ non uniforme d'intensité comprise entre 2 et 8 teslas, dans un volume de 26 mètres de long pour 20 mètres de diamètre.

### BIBLIOGRAPHIE

J. V. Berry et A. K. Geim, **Of flying frogs and levitrons**, *European Journal of Physics*, vol. 18, pp. 307-313, 1997.

R. E. Plotnick, **Relationship between biological extinctions and geomagnetic reversals**, *Geology*, vol. 8(12), pp. 578-581, 1980.

J.-S. Steyer et R. Lehoucq, **Les X-men, des mutants prometteurs**, *Pour la Science*, n° 440, juin 2014.

Tous les papiers se recyclent,  
alors trions-les tous.

**C'est aussi  
simple à faire  
qu'à lire.**

La presse écrite s'engage pour le recyclage  
des papiers avec Ecofolio.

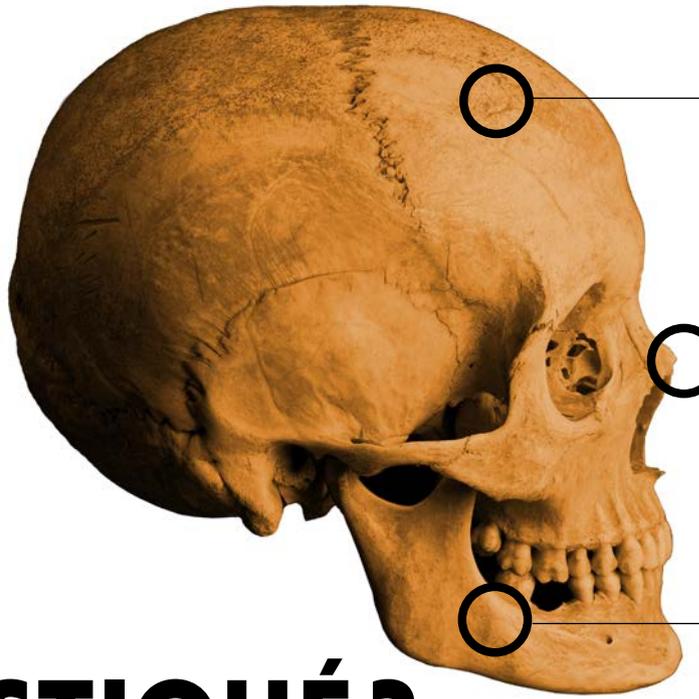


## L'AUTEUR



**HERVÉ LE GUYADER**  
 professeur émérite de biologie  
 évolutive à l'université  
 Pierre-et-Marie-Curie, à Paris

# L'HOMME S'EST-IL AUTODOMESTIQUÉ ?



**L'homme a été domestiqué, a récemment confirmé une étude de génomique. Par qui, c'est toute la question...**

**L'**archéologue Jean Guilaine définit le Néolithique comme une seconde naissance de l'homme. Il y a 10 000 ans en effet a débuté une croissance exponentielle de la population. Les innovations techniques et la sédentarisation, contemporaine de l'agriculture naissante, ont entraîné l'apparition d'un nouvel espace, la maison: «En prenant la décision de se fixer, l'homme a créé l'engrenage de sa propre domestication. [...] Cette socialisation de l'individu, secondairement complétée par la domestication des plantes et des animaux, a finalement fait de lui un être totalement dépendant de ses propres choix culturels», écrit-il en 2011 dans son livre *Cain, Abel, Ötzi, l'héritage néolithique*.

L'homme se serait-il domestiqué lui-même? L'idée n'est pas nouvelle, et l'archéologue rejoint ici les zoologistes. Déjà Darwin, en 1871, dans *La Filiation de l'homme*, montrait que la socialisation, avec ses paradoxes biologiques particuliers – soins aux blessés, vieillards... –, change la

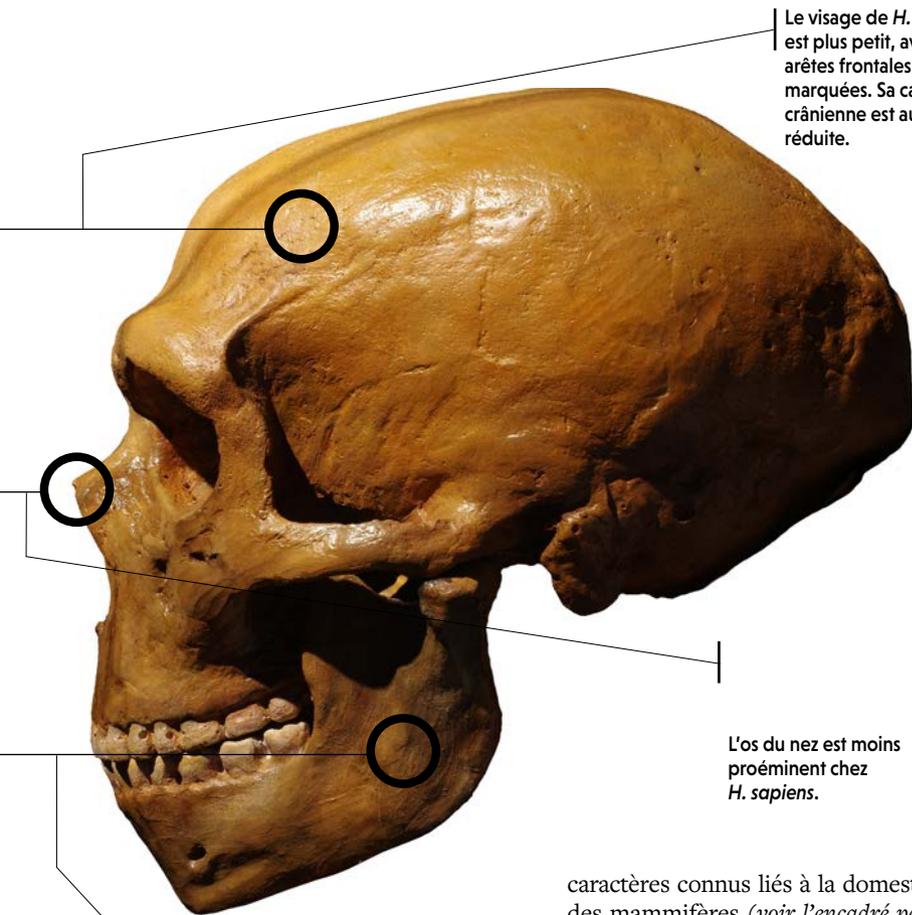
nature des processus évolutifs. Habituellement, la sélection naturelle agit à l'échelle des organismes; or, chez l'humain, la vie sociale, qui a été sélectionnée, s'oppose à la sélection naturelle au plan individuel par l'assistance aux plus faibles.

Si, jusqu'à la fin du xx<sup>e</sup> siècle, il n'existait cependant aucune preuve de cette autodomestication, les choses ont changé. En une vingtaine d'années, les connaissances sur ce phénomène, issues de différentes disciplines, se sont accumulées et, récemment, une explication novatrice a pu être proposée. En effet, l'étude de la domestication a conduit à répertorier les traits héréditaires présents chez les organismes domestiqués et absents chez leurs apparentés sauvages, rassemblés sous le nom de syndrome de domestication. Et l'étude précise des mammifères suggère fortement que l'homme a connu un tel syndrome, comparable à celui du chien.

En 2003, notamment, Helen Leach, anthropologue à l'université d'Otago, en Nouvelle-Zélande, a dressé la liste des



**Homo sapiens**  
 Les plus anciens fossiles connus remontent à 300 000 ans.



Le visage de *H. sapiens* est plus petit, avec des arêtes frontales moins marquées. Sa cavité crânienne est aussi réduite.

L'os du nez est moins proéminent chez *H. sapiens*.

La mâchoire de *H. sapiens* est plus petite que celle de l'homme de Néandertal.



**Homo neanderthalensis**  
A vécu en Europe, au Moyen-Orient et en Asie il y a entre 450 000 et 35 000 ans.

caractères connus liés à la domestication des mammifères (voir l'encadré page 94). Elle soulignait ensuite que, durant le Pléistocène supérieur (126 000 ans à 12 000 ans avant notre ère), le squelette de certains groupes d'hommes modernes avait subi des changements semblables à ceux des animaux domestiques, lesquels avaient continué durant la période géologique suivante (la nôtre), l'Holocène. Ces arguments suggéraient que les hommes modernes avaient été physiquement domestiqués, mais, pour Helen Leach, ils étaient insuffisants, car indirects.

#### LES RENARDS DE BELYAEV

Des renards ont cependant mis les chercheurs sur la piste d'une preuve plus directe. En 1959, le biologiste russe Dmitri Belyaev avait débuté, à l'Institut de cytologie et de génétique de Novosibirsk, une domestication de renards argentés élevés, au départ, pour leur fourrure. La sélection portait sur un seul critère comportemental, la docilité, c'est-à-dire la possibilité d'établir une relation non agressive avec l'homme. Si, en 1965, à la 6<sup>e</sup> génération, 1,8% des animaux présentaient une familiarité avec l'homme, en 2002, à la 42<sup>e</sup> génération, ils étaient 71,2%.

Quelle ne fut pas la surprise de Belyaev et de Lyudmila Trut, qui poursuivait l'expérimentation, de voir surgir des caractères

#### EN CHIFFRES

# 400

millions d'humains peuplaient la Terre durant le haut Moyen Âge. Il y a 40 000 ans, ils n'étaient que 800 000.

# 49 %

des renards argentés de Dmitri Belyaev avaient un comportement plus docile avec les humains en 1990, à la 30<sup>e</sup> génération. En 1965, à la 6<sup>e</sup> génération, ils étaient 1,8% et en 2002, à la 42<sup>e</sup> génération, 71,2%.

phénotypiques classiques des chiens domestiqués! Pelage aux taches blanches, oreilles tombantes, queue en tire-bouchon... Puis, après des années de sélection, raccourcissement du museau et élargissement du neurocrâne. Or, chez les chiens, les généticiens avaient déjà remarqué que les races de compagnie, comme l'épagneul King Charles, exhibent des faces plates, tandis que les races de berger ou de défense ont encore un long museau identique à celui du loup – comme si la docilité était inversement corrélée à la longueur des mâchoires, phénomène retrouvé chez les bovins et les porcins.

Les deux chercheurs eurent l'idée de suivre parallèlement l'exploration de l'espace chez les jeunes et la concentration sanguine du cortisol, une hormone libérée lors d'un stress physique ou psychologique, afin d'évaluer leur comportement joueur. Chez les mammifères, le jeu des jeunes est en effet décisif dans l'apprentissage des relations sociales. Les animaux sélectionnés pour leur docilité se sont révélés joueurs et non stressés, explorant bien plus longtemps l'espace, avec un taux de cortisol sanguin bien plus bas que chez les animaux sauvages. De plus est apparue une dérégulation de la saison de reproduction, la période de rut passant de moins d'un mois à plusieurs. Ainsi, la sélection portant sur un seul caractère, la docilité, s'était >

> répercutée sur nombre de traits morphologiques et physiologiques qui, au premier abord, ne paraissent pas corrélés.

### LA CLÉ: LA CRÊTE NEURALE

Un généticien y voit immédiatement de la pléiotropie, c'est-à-dire le fait qu'un gène détermine plusieurs caractères. Mais comment trouver de tels gènes? Trois pistes ont été explorées.

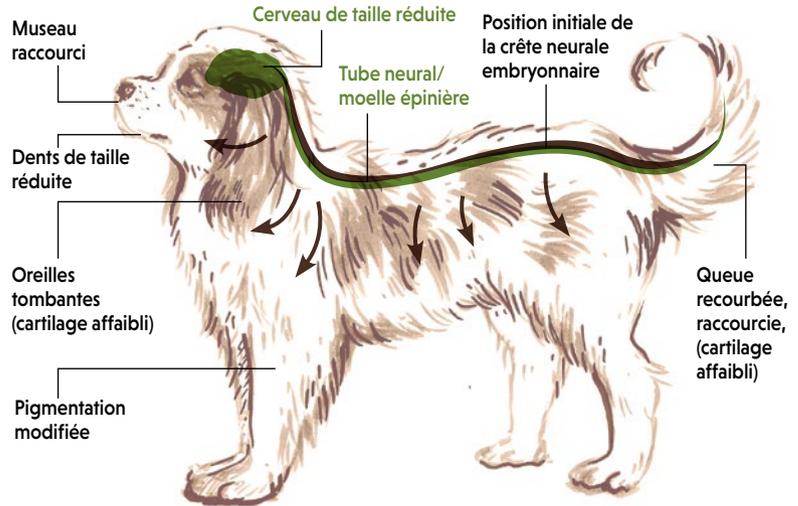
En 2004, Elena Jazin, de l'université d'Uppsala, en Suède, a cherché, dans certaines parties du cerveau du chien, du loup et du coyote des gènes présentant des différences d'expression. Les expressions de deux gènes particuliers, *NPY* et *CALCB*, présentent des différences notables entre le chien et les animaux sauvages. Or ils sont impliqués dans le contrôle de l'appétit, de l'anxiété et de la régulation de l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien, qui commande la sécrétion du cortisol, ce qui est cohérent avec les données de Belyaev.

Plus récemment, en 2014, Adam Wilkins, théoricien de l'évolution à l'université Humboldt, à Berlin, a réalisé une véritable percée conceptuelle en proposant une explication unitaire embryologique: la plupart des caractères morphologiques et physiologiques partagent un développement dépendant des cellules de la crête neurale. Ces dernières sont des cellules souches multipotentes qui proviennent, dans l'embryon des vertébrés, de la partie dorsale du tube neural, puis qui migrent ventralement, dans le crâne ou dans le tronc, pour constituer, à des endroits précis, des cellules précurseurs de tissus particuliers: crâne (en particulier les mâchoires), cartilage des oreilles, ganglions sympathiques, glandes surrénales, mélanoblastes donnant la pigmentation de la peau, odontoblastes précurseurs des dents, cartilage de la queue. Bref, si on reprend la liste des traits du syndrome de domestication, on comprend qu'un léger déficit de migration de cellules de la crête neurale suffit à les engendrer.

Enfin, en 2017, Cedric Boeckx, de l'université de Barcelone, a généralisé de manière astucieuse une étude de génomique. On avait déjà comparé les génomes entiers de chiens et de loups, afin de repérer les gènes qui, sous sélection chez les premiers mais pas chez les seconds, sont ceux corrélés à la domestication. Cedric Boeckx a étudié de cette manière le cheval, le chat, le porc... et l'homme. Mais, si trouver les pendents sauvages pour les animaux est aisé, comment faire pour l'homme? Il a eu l'idée géniale de prendre les génomes des hommes de Néandertal et de Denisova.

## LES TRAITES DE LA DOMESTICATION

Certains affectent le squelette : corps plus petit, squelette moins robuste, capacité crânienne réduite, face raccourcie, dents resserrées, dimorphisme sexuel amoindri. D'autres, invisibles pour l'archéologue, ne touchent que les tissus mous, la biochimie ou le comportement : pelage de couleurs variées, meilleur stockage des graisses et lactation, sexualité précoce et saisons de reproduction plus longues, comportement juvénile à l'âge adulte, activité motrice réduite, information moins bien acquise, agressivité diminuée au sein de l'espèce, surtout chez les mâles, docilité accrue.



Un léger déficit de migration de cellules de la crête neurale suffit à produire les traits du syndrome de domestication.

Il a tout d'abord cherché les gènes sous sélection de domestication, c'est-à-dire qui diffèrent entre *Homo sapiens* et les hommes de Néandertal et de Denisova, puis, parmi eux, ceux communs aux autres animaux. Il en sort 5, dont 3 semblent cruciaux: si *RNPC3* joue un rôle dans le fonctionnement de l'hypophyse, *NR2F1* et *BRAF* régulent des gènes impliqués dans le développement et le fonctionnement des crêtes neurales. Quelle confirmation pour l'hypothèse de Wilkins!

L'homme s'est donc autodomestiqué – sans doute en deux étapes, au Paléolithique et au Néolithique. Certes, la maison a dû être le lieu de l'autodomestication humaine la plus récente. Mais n'y aurait-il pas eu un effet coopératif entre homme, animaux et végétaux? Raisonons d'un point de vue biologique. Imaginons des paysans travaillant dans leurs champs, avant la toute récente mécanisation, par exemple les Asiatiques assujettis à leurs rizières, et demandons-nous qui a domestiqué qui. Un biologiste assurerait que le riz a domestiqué l'homme... Et il en est de même pour les autres grandes cultures vivrières (blé, maïs, pommes de terre, manioc, etc.), dont l'expansion et la productivité ont décuplé, même si fruits, graines ou tubercules sont mangés par l'homme... ■

### BIBLIOGRAPHIE

C. Theofanopoulou et al., **Self-domestication in *Homo sapiens*: Insights from comparative genomics**, *Plos One*, vol. 12(10), e0185306, 2017.

B. Hare, **Survival of the friendliest: *Homo sapiens* evolved via selection for prosociality**, *Ann. Rev. Psychol.*, vol. 68, pp. 155-186, 2017.

L. Trut et L. A. Dugatkin, **Comment transformer un renard en chien**, *Pour la Science*, n° 479, pp. 64-71, 2017.

A. Wilkins et al., **The "domestication syndrome" in mammals: a unified explanation based on neural crest cell behavior and genetics**, *Genetics*, vol. 197, pp. 795-808, 2014.

H. M. Leach, **Human domestication reconsidered**, *Current Anthropology*, vol. 44(3), pp. 349-368, 2003.

# Delachaux et Niestlé Devenez nature addict

LE GUIDE ORNITHO  
- ÉDITION 2009 -  
Prêté par Martin G.

18 AVERSES

1 754 HEURES D'OBSERVATION

251 ESPÈCES OBSERVÉES

1 RENCONTRE AVEC UN AIGLE ROYAL

20 NUITS À LA BELLE ÉTOILE

-10°C L'HIVER, +40°C L'ÉTÉ



[www.delachauxetniestle.com](http://www.delachauxetniestle.com)

Depuis 130 ans, Delachaux et Niestlé s'impose comme l'éditeur nature par excellence. Sa collection de guides tout-terrain fait référence en matière d'identification, tant auprès des experts que des débutants. Les « Guides Delachaux » déclinent ainsi plus de

100 titres consacrés à l'ornithologie, la botanique, l'entomologie, la zoologie, la géologie... Des textes signés par les plus grands spécialistes, accompagnés d'illustrations exceptionnelles de précision pour une identification facilitée lors de vos sorties nature.

**DELACHAUX ET NIESTLÉ** - Éditeur nature depuis 1885



PHOTO: JF CHAVANNE

## L'AUTEUR



**HERVÉ THIS**  
physicochimiste,  
directeur du Centre  
international de  
gastronomie moléculaire  
AgroParisTech-Inra, à Paris

# MERINGUES EN POUPÉES RUSSES

Rien n'empêche d'emboîter des meringues de consistances différentes. Et de faire ainsi des sortes de matriochkas meringuées, croquantes au cœur et tendres à l'extérieur.

**L**es meringues ont souvent l'extérieur croquant et l'intérieur mou, mais comment faire un cœur dur? C'est ce que nous allons voir ici.

Les meringues sont de plusieurs types. Il y a tout d'abord les meringues françaises, que l'on obtient en battant des blancs d'œuf en neige, en ajoutant du sucre et en battant encore; on cuit la préparation à 130°C pendant une vingtaine de minutes, afin d'assécher la surface et de produire une couche croquante de quelques millimètres d'épaisseur. Puis on finit de cuire à la température d'environ 100°C, pendant des durées allant de 30 minutes à plusieurs heures, selon que l'on veut des cœurs mous ou un intérieur uniformément croquant.

La meringue italienne s'obtient en battant des blancs en neige, puis en y versant, toujours en fouettant, un sirop de sucre (saccharose) porté à une température d'environ 125°C.

Citons encore la meringue suisse, que l'on produit en fouettant des blancs d'œuf et du sucre et en chauffant l'ensemble au bain-marie, afin de lui faire atteindre une température d'environ 45°C; la préparation est ensuite utilisée sur une autre préparation, et cuite au four à 100°C.

Enfin, il y a les «cristaux de vent», que j'avais introduit en 1988. On les obtient en battant un blanc d'œuf en neige, puis en alternant l'ajout de sucre et d'un liquide qui a du goût (tel un jus de fruit) pendant que l'on bat. On produit ainsi des litres de mousse, que l'on cuit ensuite comme une meringue française.

Toutefois, par tous ces procédés, on a toujours un intérieur mou ou dur dans une coque dure. Comment obtenir l'inverse?

Des meringues de type «cristaux de vent» dans un dessert du cuisinier français Pierre Gagnaire.



Très simplement: il suffit de produire une meringue très dure, que l'on plonge dans une préparation pour meringue française, puis de cuire cette dernière en la gardant un peu molle. Lors de la cuisson, un peu d'eau de la meringue externe peut migrer vers la meringue interne, mais on réglera les temps de cuisson pour limiter les transferts... et l'on pourra aussi tremper la meringue interne dans de l'huile avant de la plonger dans la masse.

L'énoncé initial des divers types de meringues ne doit pas faire oublier que si les produits sont fabriqués en vue d'une consommation immédiate, il n'est pas difficile de répondre à la question posée: une meringue dure plongée dans une meringue italienne, par exemple, subsiste croquante suffisamment longtemps pour qu'on fasse la préparation avant le repas. Et il en va de même pour une meringue française bien croquante dans une meringue suisse.

Mais c'est surtout la préparation des cristaux de vent qui doit nous retenir, car si la consistance est une composante importante du goût, elle ne pallie pas la saveur ou l'odeur. Avec les cristaux de vent, on peut ainsi donner du goût aux meringues, et obtenir des cristaux de vent bien durs au centre de cristaux de vent ayant le même goût, ou un goût différent.

D'ailleurs, l'avènement de la «cuisine note à note» donne des possibilités

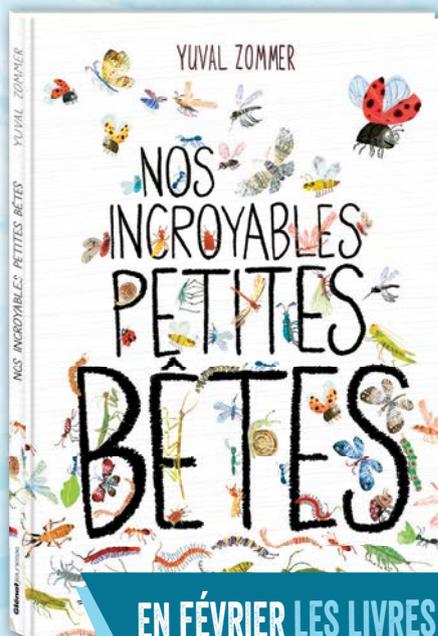
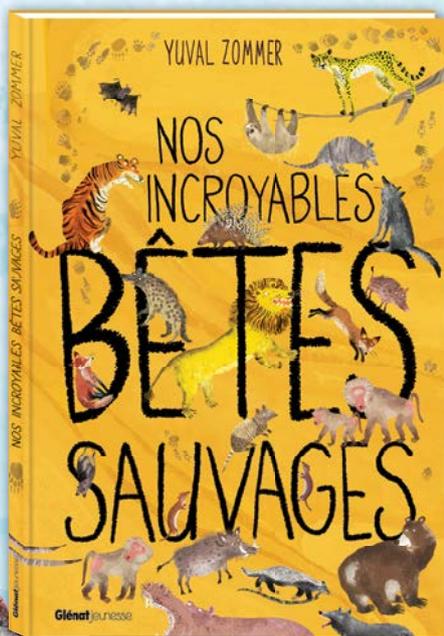
supplémentaires. Rappelons que cette forme de cuisine n'utilise plus les ingrédients classiques que sont les tissus animaux (viandes, poissons, œufs) ou végétaux (fruits, légumes), mais seulement des composés purs. Or de quoi avons-nous besoin pour faire des meringues? D'eau, de protéines qui coagulent, de saccharose... et de composés pour la couleur, la saveur et l'odeur. La recette ci-dessous permet facilement de s'entraîner. ■

## LA RECETTE



- 1 Préparer la meringue interne : dans 10 grammes (g) d'eau, dissoudre 1 g d'acide tartrique, 2 g de glucose, un peu de colorant rouge, quelques gouttes de préparation odoriférante « amande amère » et 2 g de poudre de blanc d'œuf; battre en neige, puis ajouter 10 g de sucre de table et fouetter jusqu'à consistance lisse.
- 2 Faire de petites masses grosses comme un œuf de caille, et cuire au four sur du papier sulfurisé à 130 °C pendant 30 minutes, puis pendant 2 heures à 105 °C.
- 3 Plonger une ou plusieurs petites meringues ainsi obtenues dans une masse obtenue par battage de 30 g d'eau, 3 g de protéines; quand la mousse est bien formée, on ajoute 60 g de sucre, et l'on bat encore, puis on ajoute du colorant jaune, du limonène ou du citral si l'on peut en trouver.
- 4 Cuire pendant 15 minutes à 130 °C, puis pendant une heure à 105 °C.

# NOS INCROYABLES DOCUMENTAIRES !



EN FÉVRIER LES LIVRES D'ACTIVITÉS  
EN MAI « NOS INCROYABLES ANIMAUX MARINS »

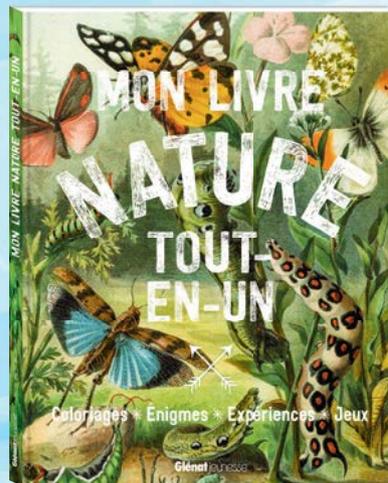
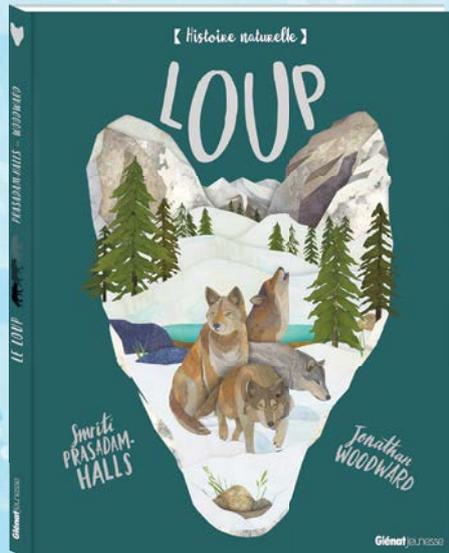


Illustration Yuval Zommer



Retrouvez tous  
nos articles sur  
[www.pourlascience.fr](http://www.pourlascience.fr)

P.24 **3,57**

**C'**est le nombre moyen de connaissances intermédiaires qui séparent actuellement deux individus pris au hasard sur le réseau Facebook.

P.42 **FENÊTRE**

**P**our étudier Pluton, en juillet 2015, la sonde *New Horizons*, après avoir parcouru 5 milliards de kilomètres, a eu 9 minutes pour passer à l'intérieur d'une fenêtre spatiale de 50 kilomètres sur 100. Un peu comme si vous deviez placer en une fois une balle de golf dans un trou d'un terrain de golf de New York en tirant depuis Los Angeles...

P.22 **« Les adresses électroniques et les numéros de téléphone tendent à devenir notre état civil sur Internet »**

GILLES DOWEK  
chercheur à l'Inria

P.52 **720**

**A**vec 720 types sexuels répertoriés, le blob, une cellule géante apparentée aux amibes, n'a aucune difficulté à trouver un partenaire pour se reproduire : il suffit que leurs types sexuels soient différents.

P.9 **CLEPTOPRÉDATION**

**C**e comportement alimentaire, qui consiste à choisir une proie à l'estomac plein, a été découvert chez la limace de mer. Ce gracieux animal préfère se nourrir d'hydrozoaires (des cousins des anémones de mer et des méduses) qui viennent de consommer du plancton.

P.86 **AIR NÉNUPHAR**

**U**ne petite grenouille a lévité en 1997. Deux physiciens néerlandais l'ont placée dans un gradient de champ magnétique si important que la force produite sur l'eau contenue dans ses tissus a suffi à la soulever du sol.

P.68 **SPORES**

**D**e quelques milligrammes à un gramme de spores du bacille du charbon se sont échappées d'une cheminée d'une base militaire soviétique en 1979. Au moins 68 personnes en sont mortes. Si les vents avaient soufflé vers la ville voisine, plusieurs centaines de milliers d'habitants auraient été contaminés.

# FAIRE UNE THÈSE POUR PRÉPARER L'AVENIR.

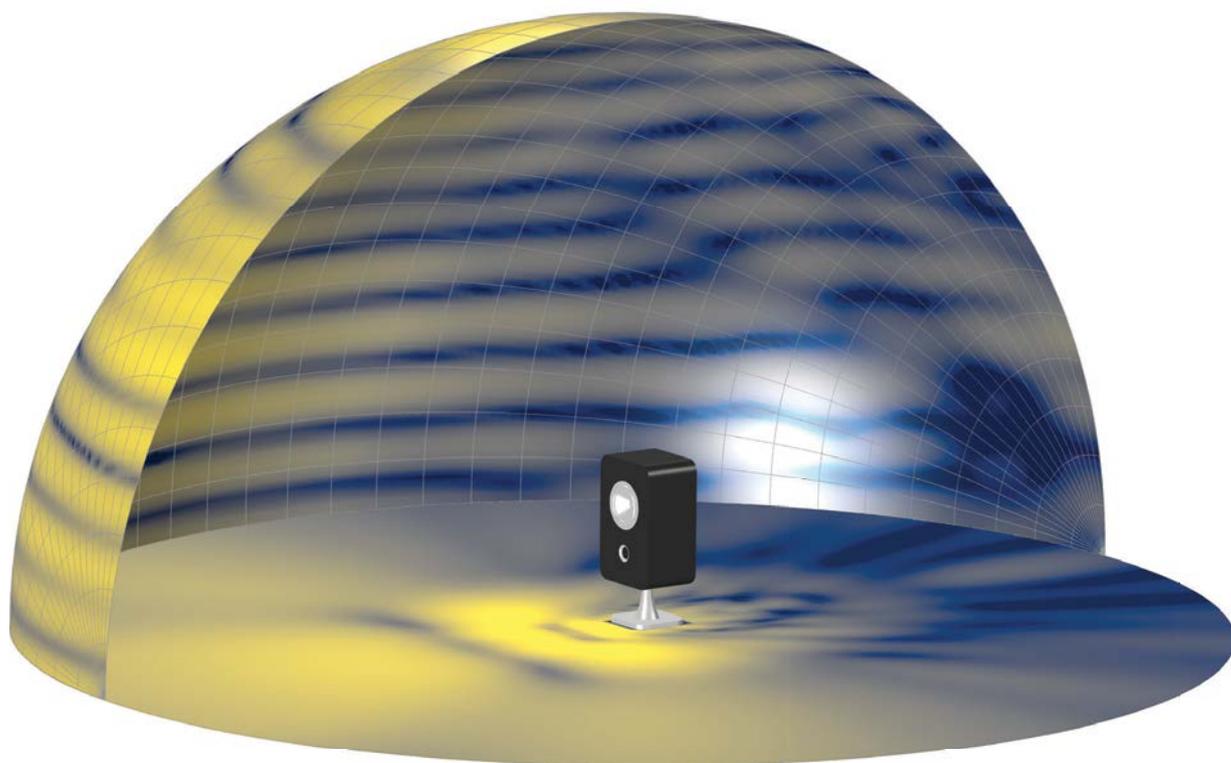


AU SEIN D'UN PARTENARIAT AVEC L'ÉTUDIANT, SON LABORATOIRE D'ACCUEIL  
ET UN COFINANCEUR PUBLIC OU PRIVÉ,  
L'ADEME FINANCE VOTRE THÈSE PENDANT 3 ANS POUR INVENTER LE MONDE DE DEMAIN.

[www.ademe.fr/theses](http://www.ademe.fr/theses)



## Pourquoi cette palette de couleurs si spéciale?



*Visualisation du niveau de pression acoustique émis par la membrane d'un haut parleur dans une enceinte basse réflexe.*

8% des hommes et 0,4% des femmes connaissent la réponse à la question. Cette palette de couleurs a été créée pour que les personnes atteintes de déficiences visuelles des couleurs puissent interpréter précisément les résultats de simulation.

La palette de couleurs Cividis, propriété du Pacific Northwest National Laboratory, est désormais disponible dans le logiciel COMSOL Multiphysics® pour simuler les designs, dispositifs et procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la production et de la recherche.

[comsol.com/release/5.3a](https://comsol.com/release/5.3a)