

ÉVOLUTION : pourquoi l'homme n'a-t-il plus de fourrure ?

■ POUR LA
SCIENCE

Mars 2011 - n° 401

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Le **Cerveau** commandé par la lumière

**Les verres optiques
de demain**

Inspirés des insectes

**Les baleines
engouffreuses**

60 tonnes d'eau
en une gorgée !

**La naissance
des étoiles**

Ce que la théorie
n'explique pas



M 02687 - 401 - F: 6,20 €



France métro : 6,20 € - DOM : 7,30 € - BEL : 7,20 € - CH : 12 FS - CAN : 10,95 \$ - Grèce : 7,60 € - LUX : 7,20 €
Italie : 7,20 € - PORT : 7,20 € AND : 6,20 € - ALL : 9,30 € - MAR : 60 DH - REU : 9,20 € - TOM surface : 980 XPF - TOM Avion : 1770 XPF

Assurance vie : alliez performance et sécurité !

L'assurance vie demeure le produit d'épargne préféré des Français. Dans la multitude des contrats présents sur le marché, la GMF se distingue par des solutions offrant rendement et sécurité.



SEREC Communication - Photo Getty Images - GMF Vie : 76 rue de Prony, 75857 Paris cedex 17

La crise financière n'entame pas la confiance des Français dans l'assurance vie ! Les cotisations collectées au 1^{er} semestre 2010 par la GMF sont en hausse de 17% par rapport à la même période de l'année précédente. Rien d'étonnant à cela lorsqu'on constate les taux servis par la GMF en 2009 et qui sont parmi les meilleurs du marché. Le rendement de ses contrats et supports d'assurance vie en euros a atteint 4,15%⁽¹⁾.

Un taux non seulement supérieur à la moyenne du marché, qui n'excède pas 3,70%⁽²⁾

en 2009, mais aussi beaucoup plus intéressant que ceux désormais offerts par les livrets d'épargne traditionnels. Ainsi, alors que ces livrets classiques garantissent à l'épargnant la sécurité contre un faible rendement, le contrat Altinéo de la GMF, lui, offre sécurité et performance. Vous profitez d'un taux minimum garanti chaque année, les intérêts vous sont définitivement acquis et génèrent eux-mêmes d'autres intérêts. De plus, vous investissez sans plafond, tout en profitant d'une fiscalité privilégiée. Profitez-en !

UNE PERFORMANCE RÉCOMPENSÉE

Depuis 2000, le contrat d'assurance vie en euros Compte Libre Croissance – aujourd'hui remplacé par Altinéo, un produit qui offre des caractéristiques et un niveau de performance similaires – a offert à l'épargnant un rendement moyen de 4,48%⁽³⁾ par an, soit plus de 36,84%⁽⁴⁾ sur 8 ans. C'est pour distinguer notamment la régularité de ses performances que les experts des Dossiers de l'Épargne ont, en 2010, décerné pour la troisième année consécutive le label d'excellence à Altinéo.

Didier Ledeur, Directeur Général de la GMF VIE

« Une expertise qui profite directement aux épargnants »

« La GMF propose une large gamme de produits d'assurance vie, d'épargne et de placement depuis maintenant plus de 30 ans. C'est cette expertise, constituée au fil des ans, qui lui permet aujourd'hui d'afficher d'excellents résultats, et ce malgré un environnement économique et boursier plus difficile. L'épargnant en bénéficie directement, comme il tire profit des valeurs mutualistes qui animent au quotidien l'entreprise : refus des effets d'annonce, absence de taux « boostés » à court terme pour recruter de nouveaux clients... Sans oublier une solide santé financière, un élément indispensable dans le contexte actuel. »

Pour en savoir plus :
appelez le 0 820 809 809
(0,12€ TTC/mn) ou consultez
le site www.gmf.fr



Assurément Humain

(1) frais de gestion déduits, avant prélèvements sociaux.

(2) source : Fédération Française des Sociétés d'Assurances, estimation au 23.6.10.

(3) taux de rendement annualisé du 31.12.01 au 31.12.09, frais de gestion déduits et avant prélèvements sociaux.

(4) taux de rendement du 31.12.01 au 31.12.09, frais de gestion et prélèvements sociaux déduits.

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice de la rédaction : Françoise Pétry

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier,
Philippe Ribeau-Gésippe, Bénédicte Salthun-Lassalle,
Jean-Jacques Perrier

Dossiers Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Rédacteur : Guillaume Jacquemont

Cerveau & Psycho

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteur : Sébastien Bohler

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenot,

Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Ifédayo Fadoju

Marketing : Élise Abib

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This

Ont également participé à ce numéro : Jean-Christophe Aval,

Michael Blum, Jean-François Démonet, Jean Dénarié,

André Didierjean, Stefan Enoch, Éveline Host-Platret,

Morwena Latoche-Hartmann, Philippe Maurine,

Christian de Muizon, François Parcy, Nicolas Peretto,

Christophe Pichon, Brigitte Sénut, Stein Silva,

Valérie Simonneaux, Daniel Tacquenot, Ken Vernick.

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin
(jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Nada Mellouk-Raja
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

<http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience>

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

Adresse postale :

Service des abonnements - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06

Commande de dossiers ou de magazines :

02 37 82 06 62 [de l'étranger : 33 2 37 82 06 62]

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Canada : Edipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal,
Québec, H3N 1W3 Canada.

Suisse : Servidis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis

Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Editors : Ricky
Rusting, Philip Yam, Gary Stix, Davide Castelvecchi, Graham Collins, Mark
Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate
Wong. President : Steven Inchcoombe. Vice President : Frances Newburg.

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou
francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents conte-
nus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American »,
dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par
écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adapt-
ation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le
nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific Ame-
rican, 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-Augus-
tins - 75006 Paris].



Jeux de lumière

La lumière et l'eau sont synonymes de vie. Leur absence rend l'environnement hostile, voire menace notre survie. L'une et l'autre sont si étroitement liées à notre quotidien que nous oublions, sauf à les observer avec les yeux du chercheur, leur complexité et leurs formes multiples. L'eau est liquide, solide ou gazeuse : nuages ou icebergs, océans ou pluie, neige ou eau de boisson. La lumière, onde et particule, nous éclaire et colore le monde. Par un jeu de réflexions multiples, elle donne leurs reflets métallisés aux ailes bleues des papillons *Morpho*. Les physiiciens ont constaté qu'en plus de leur conférer leur couleur spécifique, la structure microscopique des ailes les rend rigides et hydrophobes. En reproduisant cette structure qui com-
porte plusieurs niveaux d'organisation, et dont un certain désordre n'est pas exclu, les ingénieurs obtiennent des matériaux nouveaux (voir *Des insectes à la photonique*, page 32).

Par ailleurs, les physiiciens réussissent aujourd'hui à produire un rayonnement laser à température ambiante à partir de polaritons, des états quantiques impliquant électrons et photons (voir *Les lasers à polaritons*, page 70). Ces lasers, fondés sur un principe différent de celui des lasers classiques, sont prometteurs, notamment parce qu'ils sont peu gourmands en énergie. Ils pourraient bientôt passer du labora-
toire à des applications grand public – lecteur de DVD, par exemple.

Des microalgues à visée médicale

Enfin, une méthode nouvelle – l'optogénétique –, fondée sur la lumière, permet de mieux comprendre le rôle des neurones : des flashes, administrés au moyen de fibres optiques, illuminent le cerveau de l'animal, ce qui active les neurones que le neurobiologiste a sélectionnés. Contrairement à la plupart des autres méthodes d'imagerie cérébrale disponibles, l'optogénétique permet d'activer un tout petit nombre de neurones (voir *Les neurones sous l'emprise de la lumière*, page 24). Ainsi, grâce aux modèles animaux des maladies mentales dont on dispose, on étudie de façon beaucoup plus précise les anomalies de fonctionnement des neurones, ce qui devrait permettre d'améliorer les traitements de ces pathologies.

Or cette méthode repose sur la découverte d'une protéine sensible à la lumière, extraite... d'une algue microscopique. On en conclut, d'une part, qu'une recherche fondamentale peut avoir des applications intéressantes dans des domaines très éloignés – ici l'étude du cerveau – et, d'autre part, que l'eau doit ajouter un autre qualificatif à son actif : source de microalgues à visée médicale !

1

ÉDITO

4

BLOC-NOTES

Didier Nordon

Actualités

6

Expansion de l'homme moderne : la voie arabe

7

Une cape d'invisibilité... aux ultrasons

10

Haïti : une faille sous la faille

12

Un théorème pour jeux de cubes... et bien d'autres sujets.

14

ON EN REPARLE

Opinions

16

POINT DE VUE

Il faut sauver la métallurgie !*Yves Bréchet*

17

ÉCONOMIE

L'immolation du petit vendeur...*Ivar Ekeland*

18

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Les plantes, des épurateurs de l'air intérieur ?*Damien Cuny*

20

VRAI OU FAUX

Naît-il plus de garçons que de filles ?*Jean-Marc Rohrbasser*

22

COURRIER DES LECTEURS

À LA UNE

24

NEUROSCIENCES

Les neurones sous l'emprise de la lumière*Karl Deisseroth*

En associant l'optique et la génétique, les neuroscientifiques contrôlent l'activité électrique de neurones dans le cerveau d'animaux vivants ; ils espèrent pouvoir extrapoler leurs résultats à l'homme pour en apprendre davantage sur les maladies mentales.

32

NANOSCIENCES

Des insectes à la photonique*Serge Berthier*

Les ailes des insectes présentent des structures qui contrôlent la propagation de la lumière. Les physiciens s'en inspirent pour élaborer de nouveaux matériaux.



40

BIOLOGIE ANIMALE

Les baleines engouffreuses*Jeremy Golbogen*

Comment certaines baleines à fanons parviennent-elles à consommer plus d'une tonne de krill par jour ? De nouveaux moyens d'observation ont révélé une biomécanique alimentaire originale.



48 **ASTRONOMIE** Étoiles : une naissance obscure

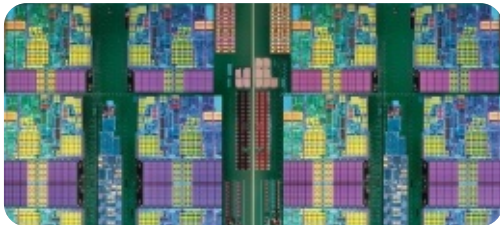
Erick Young

Les étoiles naissent de l'effondrement d'un nuage de gaz et de poussière. Mais si les grandes lignes de ce scénario sont connues, plusieurs questions restent ouvertes.

56 **ÉLECTRONIQUE** Les attaques de circuits intégrés

John Villasenor

Des microcomposants peuvent être introduits à des fins malveillantes dans des circuits intégrés avant leur sortie d'usine. Tout dispositif électronique est une cible potentielle.



62 **ÉVOLUTION** Pourquoi l'homme n'a-t-il plus de fourrure ?

Nina Jablonski

De récentes découvertes dévoilent pourquoi et quand les hominidés, contrairement aux autres primates, ont perdu leur fourrure. Et l'apparition d'une peau quasi nue aurait favorisé l'émergence d'autres caractéristiques humaines.



70 **PHYSIQUE** Les lasers à polaritons

Guillaume Malpuech et Dmitry Solnyshkov

Les physiciens développent des lasers d'un nouveau type, fonctionnant à très faible énergie. Ces dispositifs sont fondés sur les polaritons, des états particuliers créés à partir d'électrons et de lumière.

Regards

78 **HISTOIRE DES SCIENCES**

Comment la France adopta l'heure de Greenwich

Jacques Gapiillard

Il y a 100 ans, après presque 30 ans de résistance, la France abandonnait l'heure de Paris pour se mettre à celle de Greenwich... sans pour autant l'indiquer explicitement dans le texte de loi.

82 **LOGIQUE & CALCUL**

Mesurer les chercheurs

Jean-Paul Delahaye

La folie évaluatrice dans le monde de la recherche scientifique a provoqué une multiplication des méthodes. L'indicateur de Hirsch est devenu le moyen le plus expéditif de noter un chercheur.

88 **ART & SCIENCE**

L'homme descend du crocodile...

Philippe Charlier

90 **IDÉES DE PHYSIQUE**

Le cerveau ausculté avec des supraconducteurs

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

93 **SCIENCE & GASTRONOMIE**

Dernières nouvelles des soufflés

Hervé This

94 **À LIRE**

Sur la totalité des numéros :

deux encarts d'abonnement pages 24 et 25.

Encarts commande de livres et abonnement pages 72 et 73.

En couverture : © Eamon O'Donoghue/illustration Works/Corbis

Rendez-vous sur **SCIENCE.fr**

» Plus d'informations

- L'intégralité de votre magazine en ligne
- Des actualités scientifiques chaque jour
- Plus de 5 ans d'archives
- L'agenda des manifestations scientifiques

» Les services en ligne

- Abonnez-vous et gérez votre abonnement en ligne
- Téléchargez les articles de votre choix
- Réagissez en direct
- Consultez les offres d'emploi

www.pourlascience.fr

→ AVIS DE RECHERCHE

Pendant des siècles, les Chinois ont bandé les pieds des femmes ; les Égyptiens ont enroulé les momies dans des bandelettes ; mille peuples divers ont été fascinés par les volutes, les circonvolutions, les virevoltes, les nœuds, les arabesques, les drapés, les boucles, les spirales, les serpents qui se mordent la queue, etc. Et, jusqu'au XIX^e siècle, personne n'aurait songé à jouer avec un ruban et lui donner la forme dont nous attribuons la découverte à un mathématicien aussi tardif que Möbius (1790-1868) ? C'est invraisemblable ! D'une civilisation à l'autre, on n'a cessé de découvrir et redécouvrir le théorème de Pythagore, mais tout le monde serait passé à côté du ruban retourné sur lui-même, figure pourtant plus tangible qu'un triangle rectangle ? Allons donc !

Affirmons-le sans crainte de nous tromper : le ruban de Möbius est connu depuis la plus haute antiquité. Reste maintenant un petit travail pratique, un travail facile, puisqu'il consiste en une simple vérification : découvrir les documents passés confirmant notre affirmation.

laissées en friche depuis que nous notons tout, sont délabrées. Moyen de commandement, d'appropriation du savoir et du pouvoir par des minorités, le développement de l'écriture durcit les hiérarchies sociales. Les écrits diffusent des propagandes ignobles : *Protocole des Sages de Sion*, *Mein Kampf*, *Petit Livre rouge*... Sans l'écriture, mettre au point l'arsenal qui nous menace n'aurait pas été possible ; la planète ne serait pas envahie par des bureaucraties stérilisantes, qui surveillent, fichent, maintiennent des ordres iniques.

Au vrai, ce qui me trouble n'est pas la question d'absoudre ou condamner l'écriture. C'est le fait qu'il est exclu que l'humanité entreprenne un tel bilan. Il était possible aux analphabètes d'imaginer l'écriture, il ne nous est plus possible d'imaginer un retour à un monde sans écriture. Il en va de même de tous les grands virages que prend l'humanité. L'actuelle révolution numérique se poursuivra sans que jamais l'humanité l'examine en sa globalité, pèse le pour et le contre, puis décide.

Alors, évaluons, puisque la mode le veut. Mais sachons que les transformations majeures se moquent de nos évaluations, et nous emmènent là d'où, de toute manière, nous ne saurons pas revenir.

Reste que celui qui voit « relativiste » comme un terme péjoratif se révèle persuadé que ses propres valeurs morales et culturelles ne sont pas relatives. Ce sont des absolus. De là à penser qu'elles devraient s'imposer universellement, il n'y a pas loin. Il s'inscrit ainsi dans une tendance dont notre société connaît les dangers, mais n'est pas aussi débarrassée qu'elle le prétend.

Moralité. Soyez prudent avant de dénigrer quelqu'un. Vous risquez de vous trahir plus que vous ne le souhaitez.



→ RETOUR INTERDIT

Ah, la mode est à l'évaluation ? Eh bien, évaluons ! Je propose que l'humanité nomme un comité chargé de faire le bilan des effets que l'invention de l'écriture a eus sur elle.

L'écriture a apporté bienfaits et plaisirs – c'est une évidence, n'en parlons pas. Mais que de contreparties ! Nos mémoires,

→ UN RELATIVISME TOUT RELATIF

Rares sont les gens en France qui, ayant un minimum de considération pour le relativisme (moral ou culturel), emploient ce terme dans une acception non caricaturale. Pour la plupart, le mot « relativiste » ne sert qu'à stigmatiser un adversaire : dès que quelqu'un leur paraît laxiste, ils l'accusent d'être adepte du « tout se vaut » et le taxent de relativisme. À force, ce terme va perdre son statut de mot savant, doté par ceux qui se reconnaissent en lui d'une définition aussi nette que possible, pour se transformer en insulte, dotée par ceux qui l'appliquent à autrui d'une définition aussi extensive que possible.

→ SINGULIÈRE MATURITÉ

« Le mot "théorie" est utilisé en mathématiques avec un sens plus neutre que dans les autres disciplines : ce sont, conformément à l'étymologie (*theoria* grecque), des cortèges d'énoncés démontrés avec une même famille de techniques [...] et non pas des corpus explicatifs ou doctrinaires » (Jean-Pierre Aubin, *La mort du devin, L'émergence du demiurge*, éd. Beauchesne, 2010, p. 32).

De fait, en mathématiques, la théorie des nombres accumule les théorèmes sur les nombres, mais n'est pas une théorie du nombre : elle ne cherche pas à cerner l'essence de ce qu'est un nombre. Les théories désignées, au pluriel, par les objets qu'elles étudient (théories des graphes, des nombres...) rassemblent des observations de phénomènes. Les théories désignées, au singulier, par une abstraction unificatrice (théories de la gravitation, de la relativité, de l'évolution...), expriment

une idée générale synthétisant des situations *a priori* diverses. Plus puissantes, elles sont parvenues à plus de maturité.

Stop. Élaborer ici une théorie des théories, voire la théorie de la théorie, serait d'une ambition excessive. Rangeons-nous plutôt au bon sens populaire : « Oh, les théories, mon brave Monsieur, les théories, vous savez, il faut faire attention, on trouve de tout là-dedans. Il y a théorie et théorie. Enfin – je me comprends ! »

→ ART FUTURO-PASSÉISTE

Les artistes contemporains ne sont pas tous des artistes contemporains. Cette évidence m'est apparue le jour où j'ai reçu une invitation à une conférence, qui présentait le conférencier sous la qualité de : « Artiste contemporain ». Pourquoi préciser : artiste contemporain ? Comme si un artiste venant prononcer une conférence pouvait ne pas être vivant, c'est-à-dire contemporain !

Eh bien, si. Il faut croire qu'existent des artistes vivants non contemporains. Ce qu'on appelle « art contemporain » est un courant au sein de l'art actuel, mais n'est pas tout l'art actuel. Le mot contemporain a deux sens. Il réfère tantôt à une temporalité, tantôt à une école (que je me garderai bien d'essayer de caractériser). Il en est allé de même avec l'art nouveau et l'art moderne.

Si le courant « art contemporain » dure, il se figera en un académisme, puisque tel est le sort promis à tout ce qui dure. Alors, au XXII^e ou XXIII^e siècle, quand on qualifiera quelqu'un d'artiste contemporain, ce sera pour lui reprocher d'être archaïsant. ■



Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

la plus importante collection d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines

Le regard de l'ethnologue n° 25



Le Feu aux poudres
Une ethnologie de la « modernisation » du service public
Ghislaine Gallenga

304 pages
ill. noir et blanc
16 x 24 cm
28 €

CTHS Histoire n° 44



Tenir boutique à Paris au XVIII^e siècle
Luxe et demi-luxe
Natacha Coquery

344 pages
ill. couleur
15 x 22 cm
28 €

Orientations et méthodes n° 18



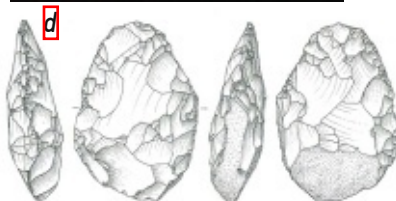
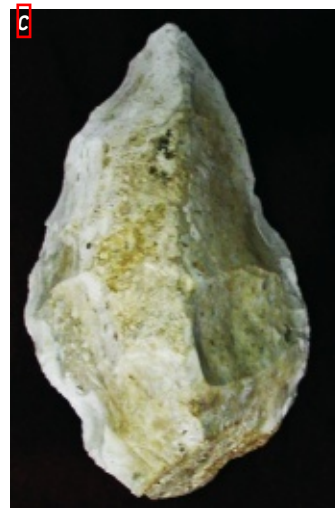
Des images et des mots
Les documents figurés dans les archives
Sous la direction de
Christiane Demeulenaere-Douyère,
Martine Plouvier et Cécile Souchon

430 pages
ill. noir et blanc
17 x 22 cm
35 €

Paléontologie humaine

Expansion de l'homme moderne : la voie arabe

D'après la forme et l'âge de pierres taillées découvertes dans la péninsule Arabique, l'homme serait sorti de son berceau africain plus tôt qu'on ne le pensait.



Fay-Ne1 est un abri-sous-roche en bord de falaise dans le massif calcaire du Djebel Faya, dans l'émirat du Sharjah (a). Son toit est aujourd'hui partiellement effondré, de sorte que sa fouille est réalisée au milieu d'un éboulis (b). Les outils lithiques retrouvés dans la couche archéologique la plus profonde, telles ces haches à main (c, d), ont été réalisés selon la technique levalloisienne, caractéristique des hommes anatomiquement modernes qui occupaient alors l'Afrique de l'Est.

Hans-Peter Uerpmann, de l'Université de Tübingen, et des collègues de divers pays ont daté à -125 000 ans des pierres taillées, selon eux, par une technique issue d'Afrique. Or ces objets ont été trouvés dans le Djebel Faya, une montagne calcaire située au milieu de la corne de la péninsule Arabique, près de Dubaï.

Les haches et autres grattoirs trouvés au sein de la strate A de la grotte nommée Fay-Ne1 ont été produits par la technique dite levalloisienne, utilisée par les hommes anatomiquement modernes qui peuplaient à l'époque l'Afrique de l'Est. En revanche, les pierres taillées de la strate B, qui surmonte la strate A de 40 centimètres de sable, relèvent d'une technique de taille locale. D'où l'hypothèse que des *Homo sapiens* africains sont passés dans la péninsule Arabique il y a plus de 125 000 ans.

Jusqu'à présent, on ne connaissait que trois sorties d'Afrique des

Homo sapiens, toutes censées s'être faites vers le Levant depuis le corridor du Nil. Les deux premières datent de 120 000 et 90 000 ans ; la troisième, il y a environ 40 000 ans, aurait été à l'origine de l'arrivée de l'homme moderne en Europe.

D'après H.-P. Uerpmann et son équipe, des hommes modernes auraient traversé le détroit de Bab-el-Mandeb, qui sépare l'Afrique de la péninsule Arabique (au niveau de Djibouti), au cours d'un maximum glaciaire, il y a environ 135 000 ans.

Le niveau de la mer Rouge était alors au plus bas et le climat très aride. L'expansion humaine vers l'Est de la péninsule Arabique aurait eu lieu au cours de la phase humide qui a suivi, et une population d'hommes modernes, parvenue dans la corne de la péninsule Arabique, y aurait été ensuite isolée par le retour de l'aridité. La persistance humaine dans cette région est attestée par les strates A et B de

Fay-Ne1. Il y a quelque 75 000 ans, le niveau des eaux du golfe Persique (profond de seulement 40 mètres) a commencé à baisser, ce qui aurait permis à cette population d'atteindre la plaine mésopotamienne, puis, de là, l'Asie ainsi que le Levant.

La découverte d'une sortie d'Afrique par la péninsule Arabique pourrait donc jouer un grand rôle dans la reconstitution de l'histoire du peuplement de la planète par *Homo sapiens*. Mais elle est loin d'être admise par tous les préhistoriens ; certains nient le caractère levalloisien des outils de Fay-Ne1 et n'y voient pas l'œuvre d'hommes modernes.

Le doute persistera tant que l'on n'aura pas mis au jour des restes d'humains modernes présents dans la péninsule Arabique il y a 125 000 ans. La chasse aux fossiles est ouverte.

→ François Savatier

Science, vol. 331, pp. 453-456, 2011

Neurosciences

Le cerveau des experts



Le shogi, ou échecs japonais, est un jeu de plateau qui se joue à deux. Les professionnels ont développé des capacités cognitives spécifiques aux différentes configurations du jeu.

Comme les professionnels des échecs, les maîtres du shogi, ou échecs japonais, jouent trois à quatre heures par jour. Contrairement aux joueurs occasionnels, ils ressentent intuitivement le meilleur coup à jouer. X. Wan, de l'Institut RIKEN des sciences du cerveau, au Japon, et ses collègues ont montré que cette capacité est liée à l'activation de régions cérébrales particulières. Ils ont enregistré par IRM fonctionnelle l'activité cérébrale de joueurs professionnels et d'amateurs de shogi quand on leur montrait différentes configurations du jeu. Le precuneus, une aire cérébrale du lobe pariétal, s'active chez les professionnels quand ils voient des configurations du jeu. Cette région est associée au souvenir à long terme des images visuospatiales. En outre, lorsque les professionnels sont pressés de jouer le coup suivant, leur noyau caudé, impliqué dans le comportement orienté vers un but, est activé. On ignore pourquoi ces aires ne s'activent pas chez les amateurs en condition de jeu, mais l'entraînement intensif des experts y est sans doute pour quelque chose...

→ **Bénédicte Salthun-Lassalle**

X. Wan et al., *Science*, vol. 331, pp. 341-346, 2011

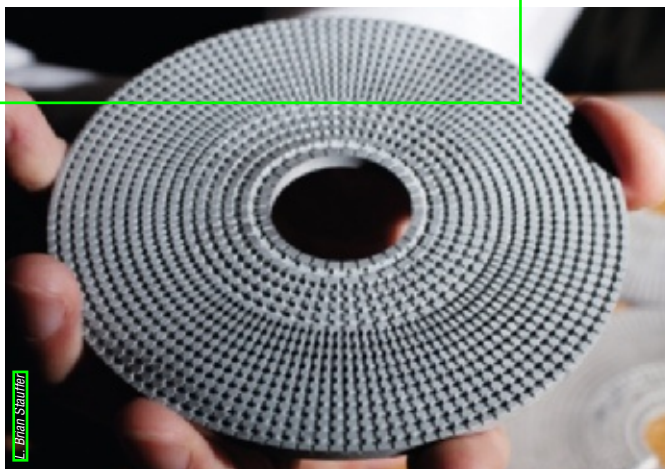
Physique

Une cape d'invisibilité... aux ultrasons

Après les avions furtifs, bientôt des sous-marins indétectables par sonar? Les travaux d'une équipe de l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign, aux États-Unis, le laissent entrevoir. Shu Zhang et ses deux collègues ont conçu une «cape d'invisibilité» aux ultrasons: une onde ultrasonore qui rencontre dans l'eau un objet entouré de cette cape se propage comme s'il n'y avait pas d'obstacle.

Les capes d'invisibilité sont des dispositifs qui dévient les ondes de façon à camoufler un objet grand par rapport à la longueur d'onde. Des prototypes pour les ondes électromagnétiques ou les vaguelettes à la surface d'un liquide ont déjà été réalisés. Les clefs de ces dispositifs sont des métamatériaux –matériaux que l'on structure à une échelle comparable aux longueurs d'onde à contrôler.

On savait qu'un tel dispositif pouvait fonctionner dans le domaine acoustique. Mais il fallait réaliser un métamatériau anisotrope, qui courbe différemment les ondes acoustiques selon leur



La cape d'invisibilité aux ultrasons conçue par l'équipe américaine.

incidence. Les physiciens se sont appuyés sur une analogie entre la propagation d'une onde acoustique dans un matériau et celle d'une tension dans un circuit électronique de condensateurs et de bobines. Leur cape devait ainsi être un réseau concentrique de petites cavités à géométrie variable reliées par des tunnels, les cavités et les tunnels correspondant aux condensateurs et aux bobines du circuit modèle.

La densité du métamatériau est croissante vers le centre, si bien que les ondes ultrasonores contournent la région centrale, guidées par les cavités plus externes. Dans l'eau, le dispositif non seulement masque un petit cylindre de métal aux ultrasons, mais reste efficace sur une large bande de fréquences ultrasonores.

→ **Marie-Neige Cordonnier**

Phys. Rev. Lett., vol. 106, 024301, 2011

En bref

L'ARN, TÉMOIN DE CANCERS

Des biologistes américains ont montré que dans plusieurs cancers, chez la souris et chez l'homme, les tissus atteints expriment des dizaines de fois plus d'ARN non codants que les tissus normaux. Ces ARN ne produisent pas de protéines, mais ont d'autres fonctions dans la cellule. Ils pourraient représenter de nouveaux marqueurs de cancers, molécules indispensables pour détecter et traiter de façon ciblée les tumeurs.

ACIDES AMINÉS SUR TITAN?

Des molécules prébiotiques pourraient se former sur Titan, la plus grosse lune de Saturne. Une équipe incluant des chercheurs du LISA (Universités Paris 7 et Paris-Est-CNRS) a soumis dix semaines durant des macromolécules azotées, similaires aux aérosols de l'atmosphère de Titan, à des conditions qui pourraient régner juste sous la surface: de l'eau à -180°C , maintenue liquide par la présence d'ammoniac. Résultat: de l'urée, de la glycine, de l'alanine et d'autres composés organiques se sont formés.

TAU PROTÈGE L'ADN

Dans la maladie d'Alzheimer, les protéines Tau contenues dans les neurones sont, pour des raisons inconnues, hyperphosphorylées (elles ont trop de groupes phosphate). Elles s'agrègent alors dans les neurones et provoqueraient leur dégénérescence. Or des neurobiologistes français ont montré que les protéines Tau déphosphorylées (normales) protègent l'ADN lors d'un stress cellulaire en se fixant dessus. La phosphorylation anormale empêcherait leur passage dans le noyau, d'où les dommages observés sur l'ADN des neurones.

En bref

MÉTISSAGES OU NON ?

Il n'y a peut-être pas eu de métissage entre *Homo sapiens* et les espèces de *Homo* plus archaïques qu'il a remplacées, tel l'homme de Neandertal. Nous pourrions tout aussi bien descendre d'une population qui aurait été longtemps séparée des autres et qui aurait survécu à l'avant-dernière glaciation, il y a 150 000 ans. C'est ce qu'affirment deux bio-informaticiens du CNRS et de l'Université d'Uppsala (Suède), qui ont comparé des simulations et des données sur l'ADN.

SUPERGEANTE ACCOMPAGNÉE

D'où vient le disque qui accompagne l'étoile supergéante en fin de vie HD 62623 ? Florentin Millour, de l'Observatoire de la Côte d'Azur, et ses collègues ont réalisé des observations spectroscopiques infrarouges avec le télescope VLT en mode interférométrique. L'image, qui atteint une résolution d'environ une milliseconde d'arc, inédite en infrarouge, révèle la forme du disque, mais aussi la vitesse du gaz. Celui-ci gravite autour de HD 62623 ; il n'a donc pas été éjecté par l'étoile. Un compagnon de la taille du Soleil pourrait en être la source.



Un glacier du Bhoutan, à l'Est de l'Himalaya.

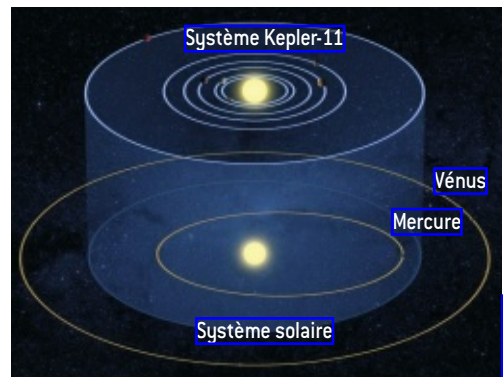
Astronomie

Six exoplanètes en transit

La méthode des transits consiste à observer la baisse de luminosité d'une étoile lorsqu'une planète en orbite autour d'elle passe devant. Cette méthode livre la période orbitale de la planète et sa taille, mais pas la masse. Les transits multiples, lorsque plusieurs planètes passent devant l'étoile, apportent bien plus d'informations : les masses des planètes et les caractéristiques des orbites. L'équipe dirigée par Jack Lissauer, du Centre de recherche Ames de la NASA, en Californie, vient de découvrir un tel système à transit multiple – le second confirmé – avec pas moins de six planètes ! De quoi en dresser un portrait complet.

Les transits de six exoplanètes de périodicités différentes ont été détectés dans le signal de l'étoile de type solaire Kepler-11, distante de 2000 années-lumière. Des variations de la luminosité de cet astre, observé par le satellite *Kepler*, correspondent à cinq planètes dont les périodes vont de 10 à 47 jours et à une sixième planète plus lointaine, dont la période est de 118 jours.

Dans un système multiple, les interactions gravitationnelles perturbent les orbites, si bien que les transits ne sont pas parfaitement périodiques. En ajustant les paramètres d'un modèle du système de façon à reproduire les décalages observés, les astro-



Le système Kepler-11, comparé au Système solaire interne.

nomes ont déduit les masses et les excentricités probables des planètes.

Les cinq planètes « internes » seraient ainsi de 2,3 à 13,5 fois plus massives que la Terre. Pour la sixième, trop distante des autres, seule une limite supérieure de 300 masses terrestres a pu être fixée.

Avec des densités comprises entre 0,5 et 3,1 (contre 5,5 pour la Terre), les planètes internes auraient un cœur rocheux avec une large enveloppe d'éléments plus légers – de la glace pour deux d'entre elles, de l'hydrogène gazeux pour les autres. Enfin, en simulant l'évolution du système sur 250 millions d'années, les chercheurs ont constaté qu'il semble stable à long terme.

→ Philippe Ribeau-Gésippe

J. Lissauer et al., *Nature*, 3 février 2011

Climatologie

Himalaya : les glaciers ne reculent pas tous

Les glaciers de montagnes reculent-ils tous sous l'effet du réchauffement climatique ? Il semble que non, d'après l'équipe de Dirk Scherler, de l'Université de Postdam. Dans l'Himalaya, certains glaciers en partie couverts de débris rocheux sont relativement stables.

Les chercheurs ont analysé les images satellitaires de 286 glaciers himalayens. Dans la région du Karakoram, au Nord-Ouest, 58 pour cent des glaciers étudiés ont révélé un front stable ou avançant faiblement. Cela tiendrait à la stabilité des températures et à l'augmentation des précipitations dans cette région.

En revanche, dans la partie centrale septentrionale de la chaîne, 83 pour cent des glaciers sont en retrait, parfois de 60 mètres par an. Globalement, 65 pour cent des glaciers sous l'influence de la mousson reculent.

Cependant, au Sud et à l'Ouest de la chaîne, le retrait est moins fréquent, et surtout moins rapide, de quelques mètres par an. Environ 70 pour cent des glaciers y sont couverts de débris rocheux sur au moins 20 pour cent de leur surface. Ceux qui se déplacent le moins sont ceux dont la couverture de débris, jouant le rôle de couverture isolante, est la plus grande, en rai-

son de la topographie des montagnes environnantes.

Cette étude confirme que les débris rocheux freinent la fonte des glaciers, indique Étienne Berthier, glaciologue CNRS au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (LEGOS), à Toulouse. Il n'y a pas de relation simple entre le recul ou l'avancée du front des glaciers couverts et les fluctuations du climat. Reste posée la question essentielle, celle de la diminution en épaisseur et en volume des glaciers, qui conditionne le régime des cours d'eau en aval.

→ Jean-Jacques Perrier

Nature Geoscience, en ligne, 23 janvier 2011

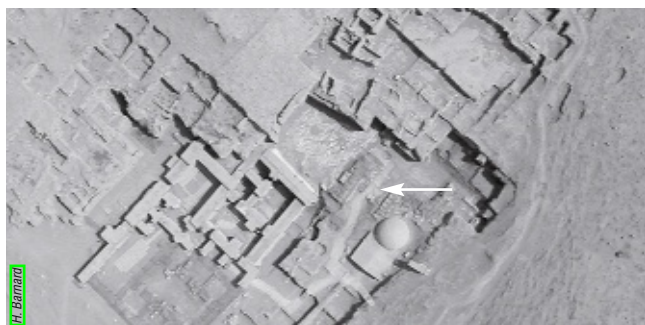
Archéologie

Le plus vieux chai du monde

Depuis combien de temps l'être humain fait-il du vin ? Depuis au moins 6 100 ans, à en croire Gregory Areshian, de l'Université de Californie à Los Angeles, et ses collègues. Ils ont mis au jour une installation complète de vinification : des grappes desséchées, les restes de grappes pressées, une presse à vin rudimentaire, une cuve de fermentation en argile, des tessons imprégnés de vin, et enfin, une coupe de dégustation. Ces vestiges ont été trouvés à Areni-1, en Arménie, près du village où avait été découverte en 2010 la plus vieille chaussure d'Eurasie.

Les artefacts ont été datés au radiocarbone, tandis que leur utilisation viticole a été démontrée par une nouvelle technique d'analyse chimique : la mise en évidence, par spectrométrie de masse, de traces de malvidine, un pigment qui donne sa couleur au raisin. Ainsi, on faisait du vin en 4000 avant notre ère, c'est-à-dire à la fin de l'ère Chalcolithique (l'âge du cuivre). Les plus anciens vestiges connus d'une activité viticole étaient, jusqu'ici, plus récents de un millénaire.

→ Loïc Mangin

H. Barnard et al., *Journal of Archaeological Science*, en ligne, 2011

Le site d'Areni-1, en Arménie, où ont été trouvés les restes [flèche] les plus anciens d'une activité viticole.

Criminalistique

ADN et couleur des cheveux

Une goutte de sang, de sperme ou de salive est retrouvée sur les lieux du crime. Peut-on en déduire l'apparence physique de l'individu qui l'a laissée ? On s'en rapproche : après la couleur des yeux et l'âge approximatif, la couleur des cheveux est désormais prédictible en se fondant sur l'ADN. Une équipe néerlandaise dirigée par Manfred Kayser, du Centre médical Erasmus, à Rotterdam, vient de le montrer. Les chercheurs ont étudié 12 gènes connus pour jouer un rôle dans la pigmentation des cheveux et élaboré un modèle qui détermine la couleur des cheveux d'un individu à partir de la combinaison d'allèles (variants) de ces gènes qu'il porte. Pour ce faire, ils ont effectué une analyse statistique sur le génotype de 385 individus, dont ils avaient préalablement noté la couleur de cheveux.

Le modèle est fiable à environ 90 pour cent pour les cheveux roux et noirs, et à plus de 80 pour cent pour les cheveux blonds et bruns. Il est aussi capable de prédire avec une bonne fiabilité certaines nuances intermédiaires. Il ne concerne pour l'instant que les individus de type européen. Reste à confirmer et étendre ces résultats.

→ Guillaume Jacquemont

M. Kaiser et al., *Human Genetics*, en ligne, 4 janvier 2011

Biophysique

Couleurs structurales sur ailes transparentes

Les spécialistes des insectes ne l'avaient pas vraiment remarqué jusqu'ici : observées sur un fond sombre, les ailes transparentes de petits diptères (moucheron, moustiques, etc.) ou hyménoptères (des microguêpes) présentent des motifs colorés stables. C'est ce qu'ont mis en évidence Ekaterina Shevtsova et deux collègues de l'Université de Lund, en Suède, et un autre biologiste américain.

Il s'agit de couleurs créées par interférence de deux ondes lumineuses. La très mince membrane de l'aile de ces insectes est faite de chitine transparente, dont l'indice de réfraction est égal à 1,57. Lorsque l'aile est éclairée, une partie (20 pour cent) de la lumière est réfléchie.

Cette composante réfléchie est elle-même la superposition de deux ondes : l'une qui a été réfléchie par la face supérieure de l'aile, l'autre qui a été réfléchie par sa face inférieure (du côté interne). Les deux ondes interfèrent, leur déphasage étant lié à l'épaisseur de membrane traversée par la seconde onde. Selon cette épaisseur et la longueur d'onde lumineuse, l'interférence est alors constructive ou destructive. Ainsi, en lumière blanche, la partie réflé-

chie par l'aile présente une couleur dominante lorsque l'observation a lieu dans de bonnes conditions (sans lumière parasite et sur fond noir).

Sur une aile donnée, on a alors un motif coloré, qui dépend des variations d'épaisseur de la membrane alaire et de la présence d'autres éléments (poils microscopiques, nervures, pigments, etc.). E. Shevtsova et ses collègues ont constaté que ces motifs varient peu au sein d'une même espèce, et que les variations permettent de distinguer des espèces différentes.

En analysant ces motifs, les biologistes ont ainsi pu déterminer que certains spécimens très ressemblants n'étaient pas de la même espèce, contrairement à ce que l'on pensait, distinction qui a ensuite été confirmée par un examen minutieux d'autres caractères morphologiques.

Les couleurs interférentielles des ailes transparentes peuvent donc constituer un nouveau critère d'identification pour certains groupes d'insectes. Et ces motifs colorés représentent une facette de plus dans l'étude génétique ou comportementale de la signalisation visuelle chez les insectes.

→ Maurice Mashaal

PNAS, vol. 108(2), pp. 668-673, 2011



Le motif de couleurs interférentielles apparaît sur les ailes d'une drosophile observée sur fond noir. Sur un fond blanc, ce motif n'est pas visible.

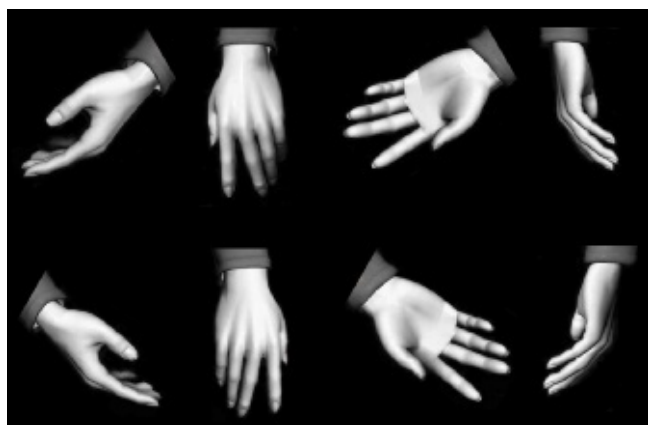
Neurobiologie

Anesthésie locale... du soi

Stein Silva, de l'Unité INSERM 825, à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, et ses collègues ont montré qu'une anesthésie locale perturbe non seulement les sensations tactiles qu'a le patient de son corps, mais aussi sa perception visuelle. Ils ont étudié 20 personnes subissant une anesthésie locale du bras avant une intervention chirurgicale, anesthésie qui engendrait une paralysie complète du membre. Les patients donnaient alors des descriptions de leur bras ne correspondant pas à la réalité (mauvaise position, changement de taille, etc.). Les neurobiologistes ont par ailleurs demandé aux patients de reconnaître des images de mains gauches ou droites, chacune présentée sous différents angles (comme ci-dessous). Résultat : les patients ont beaucoup de mal à déterminer si l'image présentée est une main gauche ou droite. Ainsi, l'anesthésie perturbe la représentation du corps et de l'environnement. Reste à trouver les régions cérébrales impliquées dans cette vision erronée du soi.

→ B. S.-L.

S. Silva et al., *Anesthesiology*, en ligne, janvier 2011



© STEIN SILVA/INSERM

Microbiologie

Bifidus antitoxique

D'après des études chez la souris, certaines bactéries probiotiques, c'est-à-dire bénéfiques si elles sont ingérées vivantes en quantités adéquates, limitent les effets d'infections parfois mortelles dues à des souches de colibacilles (*Escherichia coli*) dites entérohémorragiques. Shinji Fukuda et ses collègues de l'Université de Yokohama, au Japon, ont précisé le mécanisme protecteur d'une bifidobactérie probiotique, *Bifidobacterium longum* : l'acétate, issu de l'acide acétique produit par cette bactérie, stimulerait les défenses anti-inflammatoires des cellules épithéliales intestinales et bloquerait le passage dans le sang d'une toxine sécrétée par les bactéries pathogènes.

C'est l'une des premières études à décrypter un mécanisme d'action d'une bactérie probiotique, commente Philippe Langella, chercheur à l'INRA de Jouy-en-Josas. Elle suggère que des probiotiques bien choisis pourraient prévenir les accidents dus à des toxi-infections alimentaires.

→ J.-J. P.

S. Fukuda et al., *Nature*, vol. 469, pp. 543-547, 2011

Géophysique

Haïti : une faille sous la faille

Le 12 janvier 2010, plus de 230 000 Haïtiens ont perdu la vie en quelques minutes lors d'un séisme de magnitude 7. Pour expliquer l'origine de cette catastrophe, les sismologues ont d'abord évoqué une rupture de la grande faille cheminant au Sud de l'île de Haïti. Mais depuis, leurs observations ont révélé que l'essentiel du mouvement impliquait en fait une autre faille...

L'île d'Hispaniola ou de Haïti se trouve à la frontière qui sépare la plaque tectonique caraïbe de la plaque d'Amérique du Nord. Le coulisage d'environ deux centimètres par an entre ces deux plaques soumet la région à des forces énormes qui s'accumulent au cours du temps – et se relâchent épisodiquement lors des séismes. Pour autant, les mesures et les constatations de terrain faites après le 12 janvier 2010 ont vite montré que la grande faille sud-haïtienne n'a pas bougé.

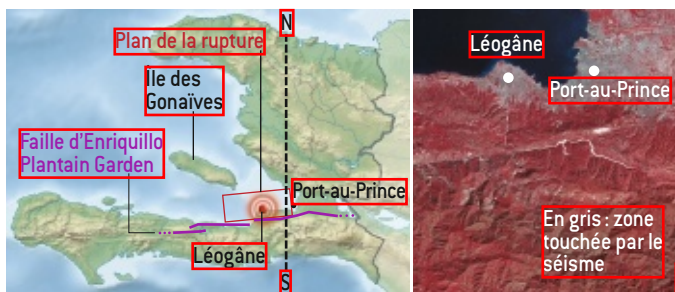
Dès lors, que s'est-il passé ? Les relevés des stations sismiques montrent que le séisme a commencé par

la rupture d'un tronçon de faille d'environ 50 kilomètres, à une vingtaine de kilomètres à l'Ouest de Port-au-Prince. Tous les modèles élaborés par les sismologues forment l'impression que l'essentiel du mouvement sismique s'est produit le long d'un plan incliné (rectangle rouge sur la carte) qui part sous le bassin de 1 500 mètres de profondeur entre la presqu'île Sud et l'île des Gonaïves et qui rejoint, vers la surface, le piémont des montagnes du Sud. Or au bas de ce piémont chemine aussi la grande faille du Sud de Haïti, ce qui explique la confusion initiale...

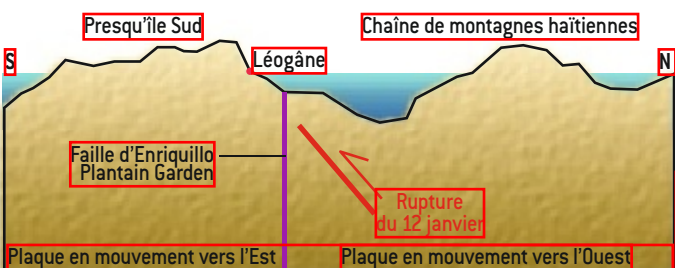
Cette grande faille n'a donc pas libéré son énergie. Et selon les sismologues, elle en a déjà emmagasiné assez pour déclencher un séisme aussi fort, sinon plus, que celui du 12 janvier 2010... Les pays de cette région, qui recèle de nombreuses failles dont le fonctionnement en cas de séisme est mal connu, ne doivent plus faire l'économie de constructions parasismiques.

→ F. S.

Nature Geoscience, 12 janvier 2011



NASA



NATURE GEOSCIENCE

En modélisant le séisme (ci-dessus, le modèle de É. Calais de l'Université de Purdue), les sismologues se sont rendu compte que la rupture ne s'est pas faite sur la grande faille sud-haïtienne [dite d'Enriquillo Plantain Garden], comme attendu, mais le long d'une faille inclinée partant en dessous de la baie de Port-au-Prince et allant vers la ville côtière de Léogâne.

Biologie animale

Les panneaux solaires du frelon

Dans *Le Frelon vert*, Britt Reed, rédacteur en chef du *Daily Sentinel*, combat le crime avec l'aide de son valet Kato. Ici, point de superpouvoirs. En revanche, on pourrait en attribuer au frelon oriental (*Vespa orientalis*), tant cet insecte est doué d'une propriété associée d'ordinaire aux plantes: la récupération et l'utilisation de l'énergie solaire. Marian Plotkin, de l'Université de Tel-Aviv, et ses collègues, ont élucidé les mécanismes de ce « photovoltaïsme » animal.

Ils se sont intéressés à la structure de la cuticule (l'exosquelette) de l'insecte, dont l'abdomen marron est traversé par une large bande jaune. La surface marron est parcourue de crêtes parallèles qui empêchent les rayons d'être réfléchis: ils sont divisés en de multiples rayons partant dans toutes les directions. En profondeur, l'examen a révélé une structure en feuillets dont l'épaisseur décroît de

l'extérieur vers l'intérieur. Deux feuillets consécutifs sont séparés par des sortes de piliers, composés de chitine. L'analyse des propriétés physiques de cet agencement a montré qu'il piège la lumière et favorise donc son absorption.

La surface de la cuticule jaune est ornée de formes ovoïdes, chacune étant percée d'au moins un trou: là encore, cette structure capturerait la lumière. La couleur jaune est celle d'un pigment, la xanthoptérine, qui convertirait une partie de la lumière solaire en énergie électrique par un processus photochimique. Pour s'en assurer, une cellule photovoltaïque à pigment photosensible a été élaborée avec la xanthoptérine: elle convertit bien la lumière en énergie électrique.

Ces résultats, ainsi que d'autres indices, suggèrent que le frelon convertit bien l'énergie solaire en électricité. Le flux d'électrons résulterait d'alimentation des



Le frelon oriental (*Vespa orientalis*).

réactions métaboliques proches du lieu de production électrique. Ainsi, le frelon oriental, doté de panneaux solaires, est bien capable de « photosynthèse » – un vrai frelon vert!

→ L. M.

Naturwissenschaften, vol. 97(12), pp. 1067-1076, 2010

Mardi 15 mars 2011 à 18h30
au Palais de la Découverte
Avenue F.-D. Roosevelt • 75008 Paris

Raconte-moi un chercheur

Pour la Science, en partenariat avec le Palais de la Découverte, vous convie, chaque mois, à passer une heure avec un scientifique.

Comment est-il devenu chercheur ? Quelles sont les différentes facettes de son métier ? En quoi consiste son travail au quotidien ?

En vous faisant partager leur expérience et en rendant leur métier plus concret, ces chercheurs ont une ambition : vous faire partager leur passion pour la science !

Palais de la Découverte **SCIENCE** POUR LA



Invité

William Rostène

William Rostène est directeur de recherche de classe exceptionnelle à l'INSERM, président de la Commission scientifique INSERM Neurosciences, et enseigne à l'Université Pierre et Marie Curie. Il travaille à l'Institut de la vision, à Paris (UMRS 968). Depuis une dizaine d'années, il étudie le rôle et la localisation des chimiokines, petites molécules impliquées dans l'inflammation, mais aussi dans la transmission nerveuse.

Mathématiques

Un théorème pour jeux de cubes

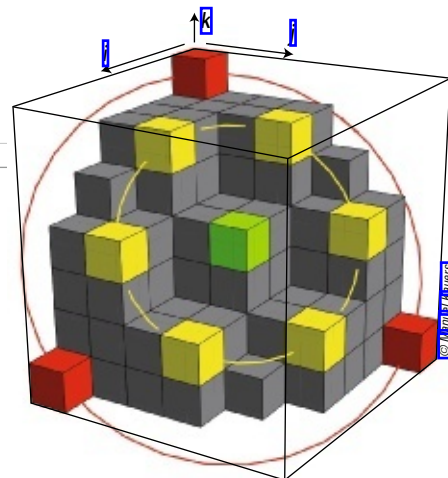
En n'utilisant que l'addition et des entiers positifs, on peut écrire l'entier 4 de cinq façons : $4, 3 + 1, 2 + 2, 2 + 1 + 1$ et $1 + 1 + 1 + 1$. On dit que l'entier 4 a cinq partitions. Dénombrer les partitions d'un entier relève de la combinatoire énumérative. Il en est de même des « partitions planes », une généralisation à deux dimensions des partitions des entiers, mises en jeu dans divers champs des mathématiques et dans des modèles de la physique statistique. Or Manuel Kauers, de l'Université de Linz, en Autriche, et deux collègues aux États-Unis, Doron Zeilberger et Christoph Koutschan, viennent de prouver une conjecture relative à ces partitions, énoncée vers 1983 indépendamment par George Andrews et par David Robbins.

Une partition plane est un tableau d'entiers positifs $P_{i,j}$ ($i = 1, 2, \text{etc.}, j = 1, 2, \text{etc.}$) dont la somme est finie et qui décrois-

sent en passant d'une ligne à la suivante ou d'une colonne à la suivante ; autrement dit, $P_{i,j} \geq P_{i+1,j}$ et $P_{i,j} \geq P_{i,j+1}$. On représente une telle partition plane par un empilement de cubes sur un damier dont chaque case est identifiée par ses coordonnées (i, j) , $P_{i,j}$ cubes étant empilés sur la case (i, j) et la verticale constituant un troisième axe k .

La conjecture démontrée porte sur les « partitions planes totalement symétriques ». Il s'agit des empilements, au sens défini plus haut, dont la forme reste inchangée lorsqu'on permute les axes de coordonnées i, j et k (voir la figure).

Dans ce cas, chaque groupe de cubes qui s'échangent entre eux forme une « orbite ». La conjecture devenue théorème fournit le nombre de partitions planes totalement symétriques (de taille maximale N) ayant un nombre donné m d'orbites : il est égal au coefficient c_m de q^m



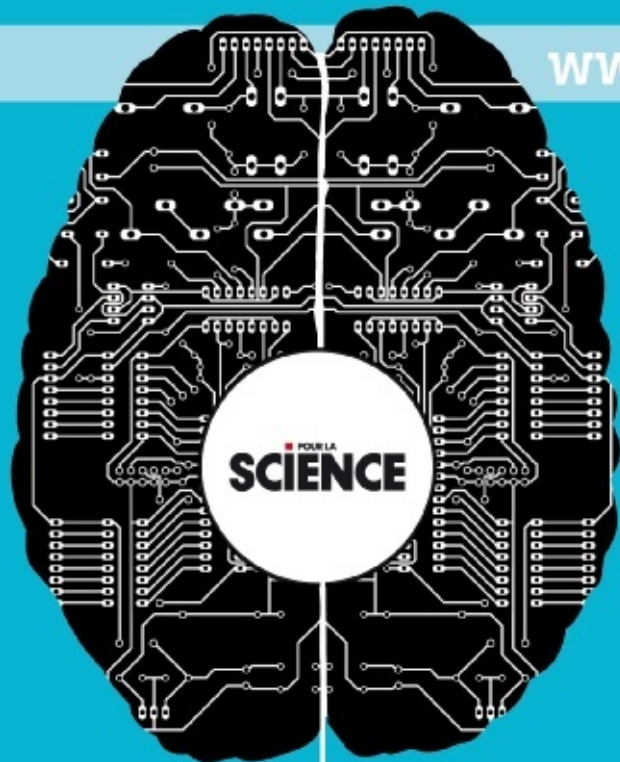
Cette « partition plane », de taille maximale égale à 8, est totalement symétrique : la figure reste identique lorsqu'on permute les axes i, j et k . Sous l'effet de ces permutations, des sous-ensembles de cubes s'échangent. Chaque sous-ensemble est nommé orbite. Trois orbites (en couleurs) sont représentées ici.

obtenu en développant en série entière $(c_0 + c_1q + c_2q^2 + c_3q^3 + \dots)$ le produit des termes $(1 - q^{i+j+k-1}) / (1 - q^{i+j+k-2})$, effectué sur toutes les valeurs $i, j, k \leq N$.

Ce résultat, où des calculs algébriques par ordinateur ont joué un rôle crucial, clot une série de conjectures relatives aux partitions planes totalement symétriques, listée par Richard Stanley en 1986.

→ M. M.

PNAS, prépublication en ligne, 24 janvier 2011



www.pourlascience.fr

Restez en contact
avec l'actualité scientifique.

Retrouvez *Pour la Science* partout sur le web :

-  Rejoignez-nous sur Facebook
<http://bit.ly/pls-facebook>
-  Suivez-nous sur Twitter
<http://twitter.com/PourLaScience>
-  Abonnez-vous à nos flux RSS
<http://bit.ly/pls-rss>
-  Recevez nos lettres d'information
<http://bit.ly/pls-newsletters>
-  Visitez notre site Internet
<http://www.pourlascience.fr>

Biologie végétale

De l'engrais-champignon

La plupart des plantes forment une symbiose dite mycorhizienne à arbuscules avec des champignons (des mycorhizes) de l'ordre des Glomales. Ces derniers s'associent aux racines de la plante et favorisent leur apport en eau et en minéraux. Des biologistes et biochimistes français ont identifié et caractérisé des signaux moléculaires, nommés Myc, qui améliorent l'association mycorhizienne et la croissance des racines. Fabienne Maillat et ses collègues ont étudié les interactions du champignon *Glomus intraradices* avec des plantes. Ils ont isolé les facteurs Myc sécrétés par le champignon et déterminé leur structure chimique par spectrométrie de masse. Ce sont des lipochito-oligosaccharides qui, ajoutés à des cultures de légumineuses, d'Asteracées (l'œillet d'Inde) ou d'Apiacées (la carotte), stimulent la formation des mycorhizes et favorisent la croissance des racines des plantes ainsi que leur ramification. Les chercheurs espèrent utiliser ces facteurs, naturels et biodégradables, sur un large spectre de cultures pour améliorer leur apport nutritif et leur résistance à la sécheresse.

→ B. S.-L.

F. Maillat et al., *Nature*, vol. 469, pp. 58-64, 2011

Psychologie

Réduire son anxiété par écrit

Vous êtes anxieux avant un examen ? Écrivez-le : Gerardo Ramirez et Sian Beilock, de l'Université de Chicago, aux États-Unis, ont montré que le fait de mettre par écrit ses inquiétudes concernant un examen augmente les performances au-dit examen. Au laboratoire, les chercheurs ont fait passer un test de mathématiques à plusieurs dizaines d'élèves en classe de troisième, auxquels ils promettaient par exemple des récompenses monétaires en cas de réussite. Avant le test, certains élèves devaient exprimer par écrit pendant dix minutes leurs sentiments, d'autres écrivaient sur un tout autre sujet et une partie des élèves ne faisaient rien. Les élèves qui décrivaient leurs craintes de l'examen réussissaient mieux que tous les autres. Ces expériences ont été répétées en situation réelle dans un collège auprès de plus de 50 élèves, avant un examen important ; les résultats sont les mêmes, notamment pour les élèves qui se disaient particulièrement anxieux.

→ B. S.-L.

G. Ramirez et S. Beilock, *Science*, vol. 331, pp. 211-213, 14 janvier 2011

Biologie cellulaire

Cancer : des cataclysmes chromosomiques ?

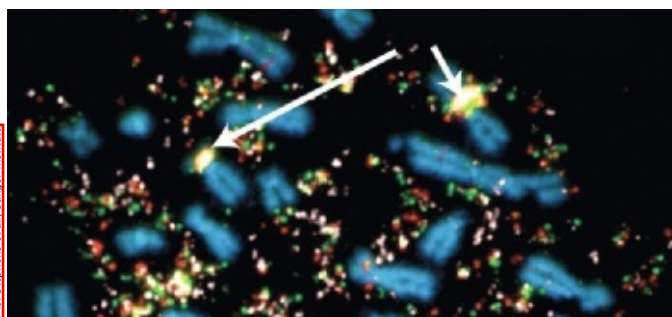
Certaines portions de chromosomes peuvent être pulvérisées en morceaux qui s'assemblent ensuite au hasard, entraînant des mutations cancéreuses, indique l'équipe de Peter Campbell, de l'Institut Wellcome Trust Sanger, en Angleterre. Ces chercheurs ont analysé le génome de dix patients leucémiques. Chez l'un d'eux, ils ont découvert 42 réarrangements, issus de cassures d'ADN, dans le bras long du chromosome 4. Et dans divers types de tumeurs issues de 3 000 personnes, ils ont trouvé, dans 2 à 3 pour cent des cas et jusque dans 25 pour cent des tumeurs osseuses, des dizaines de réarrangements concentrés dans quelques portions de chromosomes. Une des tumeurs colorectales analysées contenait ainsi 239 réarrangements dans un seul chromosome.

Selon P. Campbell et ses collègues, cela ne peut s'expliquer que par un événement cataclysmique unique : des dizaines de cassures d'ADN se produiraient simultanément lors d'une division cellulaire ; certains morceaux du chromosome seraient recollés par la machinerie de réparation de l'ADN en un patchwork n'ayant rien à voir avec l'original, créant des dizaines ou centaines de mutations dans des gènes. La plupart des cellules n'y survivraient pas, mais certaines acquerraient des mutations leur permettant de devenir cancéreuses.

Un tel cataclysme pourrait être provoqué par des radiations ionisantes ou par un dysfonctionnement au niveau des extrémités des chromosomes, les télomères.

→ J.-J. P.

Cell, vol. 144, pp. 27-40, 2011



Dans certaines tumeurs du poumon à petites cellules, le chromosome 8 est dispersé. Une partie des fragments forment des minichromosomes où l'on peut détecter, grâce à des sondes fluorescentes spécifiques (flèches), l'expression d'un gène de cancérisation qui se trouve amplifié.

DERNIÈRE minute ...

DES VIRUS FLASHÉS AUX RAYONS X

Un consortium international de 20 équipes propose une nouvelle méthode d'imagerie de corpuscules biologiques à une résolution de quelques nanomètres. L'image s'obtient à partir des quelques millions de photons diffusés en soumettant l'échantillon à une impulsion d'un puissant laser à rayons X, le *Linac Coherent Light Source* de Stanford. L'impulsion est si brève (70 femtose-

condes) qu'elle n'a pas le temps d'endommager la particule avant l'acquisition de l'image. La démonstration a été faite sur des nanocristaux de complexes protéiques et sur des gros virus.

UN NOUVEAU VECTEUR DU PALUDISME

Michelle Riehle, de l'Institut Pasteur à Paris, et ses collègues ont découvert un nouveau sous-groupe de moustiques africains *Anopheles gam-*

biae. Vivant plutôt à l'extérieur des habitations, ces moustiques sont génétiquement distincts des autres. L'une des questions est : transmettent-ils plus le paludisme que ceux d'intérieur ?



Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur www.pourlascience.fr

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ LE NOYAU DE LA LUNE

Les deux faces de la Lune n'ont pas la même apparence: celle que l'on voit présente de sombres bassins d'impact et celle qui est cachée en est dépourvue. Au moment de sa formation, une grande part de la Lune était en fusion et les roches qui la composent ont toutes cristallisé à partir d'un océan de magma. En réanalysant les données sismiques des missions *Apollo* des années 1960 et 1970 et des données plus récentes d'autres missions lunaires, les spécialistes ont montré que la croûte lunaire est plus épaisse sur la face cachée que sur la face visible. Ces deux phénomènes expliqueraient en partie leur dissemblance (voir *Les deux visages de la Lune*, *Pour la Science*, août 2008, <http://bit.ly/plsoer370>). Mais qu'en est-il des couches plus profondes de la Lune? Les scientifiques ont analysé à nouveau les données d'*Apollo* avec une méthode traitant les enregistrements sismiques terrestres et ils ont obtenu des résultats concernant le noyau lunaire (*Science*, janvier 2011). À l'instar du noyau de la Terre, celui de la Lune aurait une graine solide interne et une couronne externe en fusion; mais le noyau externe serait recouvert d'une épaisse couche partiellement fondue. Au total, le noyau de la Lune serait à 60 pour cent liquide. Ces nouveaux éléments sur



La face visible de la Lune présente de vastes « mers » sombres.

la composition lunaire devraient permettre de mieux comprendre sa formation et ses visages.

→ ARRÊTER LA FLORAISON

Beaucoup de plantes ne fleurissent qu'après avoir été soumises à une période de froid – une phase nommée vernalisation – et si le jour a une durée adaptée. Chez l'arabette des dames, la plante modèle des biologistes, les mécanismes de la floraison sont désormais connus: le froid diminue la quantité d'un inhibiteur de la floraison, nommé FLC, et la durée du jour engendre la production du florigène, la pro-

téine FT, qui migre des feuilles vers la pointe de la tige où la fleur apparaîtra (voir *Mais qu'est-ce qui fait fleurir les plantes?*, *Pour la Science*, juillet 2009, <http://bit.ly/plsoer381>). Mais toutes les plantes ne fonctionnent pas comme l'arabette. Des chercheurs suédois et français ont découvert un mécanisme distinct chez la betterave à sucre (*Science*, décembre 2010), une plante bisannuelle qui produit un tubercule la première année et ne fleurit qu'après le passage de l'hiver. Cette plante possède deux gènes proches de FT: *BvFT1*, qui stimule la floraison comme chez l'arabette, et un autre, *BvFT2*, qui au contraire la bloque. Dans ce cas, le froid de l'hiver abaisse la quantité de protéine BvFT2, permettant ainsi à la plante de fleurir.

→ BÉBÉ D'HIVER OU D'ÉTÉ

L'horloge centrale ou circadienne, contrôlée par la lumière du jour, interagit avec d'autres horloges dans l'organisme et garantit des cycles d'éveil et de sommeil calés sur 24 heures. Elle se situe dans le cerveau, notamment dans les noyaux suprachiasmatiques (voir *Au rythme du jour et des saisons*, *Pour la Science*, novembre 2010, <http://bit.ly/plsoer397>). Mais la durée d'exposition à la lumière après la naissance modifie-t-elle l'activité de cette horloge? En d'autres termes, les hommes nés en hiver ont-ils une horloge différente de ceux nés en été? Des neurobiologistes américains ont montré que des souris soumises à une luminosité hivernale après leur naissance présentent à l'âge adulte des dysfonctionnements de leur horloge circadienne, comparées à celles soumises à une luminosité estivale néonatale (*Nature Neuroscience*, décembre 2010). Notamment, l'activité des neurones des noyaux suprachiasmatiques des souris nées en hiver ne s'adapte pas aux changements de luminosité des saisons... ce qui dérègle le rythme de leur sommeil. Reste à savoir si ces perturbations de l'horloge modifient aussi l'humeur ou le risque de développer des troubles anxieux, parfois liés au manque de lumière ou à l'hiver.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

→ ALZHEIMER : UNE MAUVAISE ÉLIMINATION DE PROTÉINES

La maladie d'Alzheimer se caractérise par la présence de plaques dites amyloïdes dans les neurones, et d'amas dits neurofibrillaires dans les ramifications des neurones. La maladie pourrait survenir quand la protéine bêta-amyloïde est produite en trop grande quantité ou sous forme d'une molécule prompte à s'agréger: les plaques se formeraient, altérant le fonctionnement des neurones, voire leur survie (voir *Pour oublier la maladie d'Alzheimer*, *Pour la Science*, août 2006, <http://bit.ly/plsoer346>). Des neurobiologistes de l'École de médecine à Saint-Louis, aux États-Unis, suggèrent que l'accumulation des plaques serait plutôt due à une diminution de l'élimination de la protéine (*Scienceexpress*, décembre 2010). Ils ont comparé la production cérébrale et la clairance – l'élimination – des protéines A bêta 40 et A bêta 42 (constitutives des plaques amyloïdes) chez 24 personnes de plus de 60 ans, dont 12 souffraient de la maladie. Pour ce faire, ils ont injecté un métabolite radioactif aux participants et leur ont prélevé du liquide céphalo-rachidien pendant deux jours pour doser les protéines. Que les participants soient malades ou non, la quantité de protéines bêta-amyloïde produite est la même; en revanche, la clairance des malades est 30 pour cent plus faible que celle des personnes saines.



Vous recherchez pour votre enfant des vacances originales, enrichissantes et sûres ? Des "colonies de vacances" vraiment différentes, sur une multitude de thèmes passionnants ? Ou des séjours linguistiques efficaces et ludiques ? Ou encore des séjours sportifs à teneur garantie en imaginaire et en découverte ? Votre solution a un nom : Telligo, leader des vacances à thèmes pour les 4-18 ans...

Nos 3 points forts

1. Des contenus enrichissants

Tous nos séjours – qu'ils soient scientifiques, artistiques, sportifs, linguistiques... – sont construits autour de sujets passionnants. Si vous recherchez pour votre enfant des vacances intelligentes avec des jeunes qui lui ressemblent, vous aurez l'embarras du choix parmi nos 122 thèmes différents (dont 22 nouveautés), proposés à près de 350 dates, dans 20 pays différents répartis sur tous les continents.

2. Tous les ingrédients des vacances

L'après-midi est – le plus souvent – consacré à la détente. Le grand jeu de milieu de séjour permet aux animateurs de dévoiler tous les talents, et aux enfants de lâcher la bride à leur imaginaire. Enfin, chaque soir, une veillée toujours différente ponctue la journée. C'est cet équilibre subtil entre détente et ateliers qui fait des séjours Telligo de vraies vacances !

3. Objectif : votre tranquillité d'esprit

Un taux d'encadrement d'1 animateur pour 5 à 8 jeunes selon l'âge et la gamme de séjours, des procédures très rigoureuses (notamment en matière d'activités sportives, de recrutement, d'hygiène de vie...), des nouvelles quotidiennes sur le web (sauf sur les séjours "Primo" et certains séjours à l'étranger), etc. : notre Charte de qualité et de sécurité garantissent la fiabilité de nos prestations. Nous vous garantissons aussi des tarifs, fermes et définitifs, même, pour les séjours à l'étranger, en cas de variation du cours des devises ou de hausse des taxes d'aéroport.

3 moyens pour recevoir nos catalogues :

- Tél. : 01 46 12 18 50 (lun.-ven. de 9h à 18h30, sam. de 9h à 13h)
- WEB : www.telligo.fr

- Renvoyez le coupon ci-contre (ou recopiez-le) à :

Telligo - 1 rue de l'Egalité 92227 BAGNEUX CEDEX

Telligo - SASU au capital de 1 440 000 €
RCS Nanterre S22 047 899 - APE : 7911Z
Immatriation N° 80292100023 auprès du Registre
des Opérateurs de Voyages et de Séjours
Assurance RC professionnelle HSCOR N°75 833

Je souhaite recevoir le catalogue des séjours été et Toussaint 2009

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____

Année(s) de naissance du (ou des) jeunes(s) : _____

POINT DE VUE

Il faut sauver la métallurgie !

Alors qu'elle est étroitement liée aux industries classiques et de pointe, la métallurgie française est en déclin. Un sursaut de son enseignement et de la recherche s'impose.

Yves BRÉCHET

Pourquoi se préoccuper de la métallurgie, parfois perçue comme une science du passé, une industrie d'un temps révolu, un héritage encombrant des maîtres de forges ? Pourquoi s'inquiéter de la désaffection des étudiants, des ingénieurs et des chercheurs pour ce domaine ? Certainement pas par nostalgie : comme l'illustre le récent rapport de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies, l'avenir industriel de la France en dépend en grande partie, et cette discipline est tout sauf archaïque.

Le rôle central de la métallurgie dans de nombreux secteurs industriels est évident. En France, ce domaine est associé à 1,8 million d'emplois, dont 500 000 directs. Les progrès du secteur automobile, de l'industrie nucléaire, de l'aéronautique, de la pétrochimie sont tributaires d'une meilleure maîtrise des matériaux métalliques. La diminution des émissions de gaz à effet de serre passe par l'allègement des véhicules, par l'augmentation de la température de fonctionnement des moteurs, par le développement d'un nucléaire durable.

Le recyclage des métaux, la sécurité dans les transports, le développement de prothèses orthopédiques et autres dispositifs médicaux implantés font tous aussi appel au métallurgiste. Même la miniaturisation des circuits intégrés, bien avant de rencontrer le « mur quantique », se heurtera à des problèmes métallurgiques, notamment l'endommagement des connexions.

Ce vaste secteur est ainsi stratégique pour notre pays, en termes d'activité indus-

trielle, d'exportations, d'emplois. Or il souffre d'asthénie : les étudiants le boudent, les professeurs s'en éloignent et nombre de laboratoires concernés maigrissent (une division par trois en 15 ans au CEA ou à l'ONERA) ou disparaissent. Les grandes écoles les plus prestigieuses, de même que les universités, ont abandonné leurs enseignements en métallurgie.

La désaffection des étudiants pour cette voie est exacerbée par une image historique faussée, par l'éloignement vis-à-vis des sciences et des technologies, par la désindustrialisation de notre pays et par l'absence de grands projets industriels mobilisateurs.

IL EST URGENT DE RÉINSTALLER, dans les universités et les grandes écoles, des formations de métallurgie.

La métallurgie est pourtant un champ scientifique et technique en plein renouvellement. Elle est au confluent de diverses disciplines (mécanique, physique et chimie), à la frontière entre recherche fondamentale et recherche appliquée. C'est un domaine où les besoins industriels suscitent des études fondamentales qui, à leur tour, ouvrent la voie à de nouvelles applications.

L'étude expérimentale bénéficie désormais de grands instruments (rayonnement synchrotron, réacteurs à neutrons...) et de nouvelles techniques (microscopie à champ proche, sonde tomographique à résolution atomique, techniques de corrélation d'images...). Quant à la modélisation, elle associe simulations numériques intensives

et élaboration de modèles théoriques à la fois pertinents et suffisamment simples pour être éclairants. Quelle est la finalité de ces études ? Entre autres, comprendre les liens entre la microstructure des matériaux métalliques, les traitements qu'on leur fait subir et leurs propriétés à l'échelle macroscopique. Cette compréhension, encore loin d'être satisfaisante, est essentielle pour évoluer vers la conception « sur mesure » de nouveaux métaux.

La métallurgie est étroitement liée à l'étude de la matière condensée. Elle est une science du changement d'échelle. Pour comprendre comment l'histoire thermomécanique d'un alliage conditionne sa microstructure et ses propriétés, il faut parcourir dans le temps plus de 15 ordres de grandeur (de la vibration des atomes aux durées de traitement thermique), et dans l'espace aller du nanomètre au mètre. Ces changements d'échelle dans l'organisation des atomes ou dans la dynamique des défauts posent des questions fondamentales de thermodynamique, de physique statistique, de mécanique.

Soulignons aussi que la métallurgie porte sur des systèmes maintenus loin de l'équilibre thermodynamique, là où toute la richesse de la physique non linéaire se manifeste. Et régulièrement, la physique fondamentale rencontre la métallurgie, qu'il s'agisse des phénomènes de solidification et plus généralement des changements de phase, de la chimie des surfaces, de la plasticité et de la rupture, du rôle joué par les défauts, des propriétés électroniques ou magnétiques, etc.

En science des matériaux, dont elle est par ailleurs le socle historique, la métallur-

gie joue ainsi un rôle clef : terrain d'expérimentation pour les nouvelles méthodes et les nouveaux concepts, corpus expérimental bien maîtrisé pour tester la validité des modèles. Négliger cette compétence aurait pour conséquence non seulement le déclin d'une part majeure de notre industrie, mais aussi de nous priver des outils nécessaires pour inventer celle de demain. Cela alors que des pays tels que la Chine, l'Inde – ou le Japon, qui développe des aciers et alliages pour la génération IV des réacteurs électronucléaires –, montent en puissance.

Comment enrayer le déclin français ? L'enseignement et la recherche ont un rôle essentiel à jouer. Un atout majeur de la métallurgie dans notre pays est la liaison étroite des chercheurs du domaine avec le monde industriel. Il reste encore quelques équipes de très bon niveau, reconnues internatio-

nalement, à partir desquelles peut se reconstruire un tissu performant de chercheurs. Il est urgent de réinstaller, dans les universités et les grandes écoles, des formations de métallurgie en tant que discipline constitutive du cursus d'un ingénieur.

Une fois ce besoin affiché, il faut se donner les moyens d'y répondre : recrutement d'enseignants-chercheurs, mise en place d'un système de « formation des formateurs ». L'enseignement devra aussi s'appuyer sur des contacts étroits avec le monde industriel : création de chaires industrielles, accueil à temps partiel de chercheurs de l'industrie, ouverture vers les petites et moyennes entreprises ou industries... Et des « pôles d'excellence » associant le monde académique, les grands instituts et le monde industriel sont à identifier, les actions faisant l'objet d'appels d'offres spé-

cifiques dans les organismes financeurs de la recherche.

Le temps presse. Si la métallurgie de notre pays disparaît, la physique de la matière condensée y serait grandement appauvrie. Et, du point de vue des applications, ce que la métallurgie rend possible deviendra impossible à ceux qui l'auront abandonnée.

Yves BRÉCHET, membre de l'Académie des sciences et de l'Institut universitaire de France, est professeur à l'Institut national polytechnique de Grenoble.

Sous la direction de A. Pineau et Y. Quéré, *La métallurgie, science et ingénierie*, Rapport sur la science et la technologie n° 31 de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies, EDP Sciences, 2011.



Réagissez en direct à cet article sur www.pourlascience.fr

ÉCONOMIE

L'immolation du petit vendeur...

... a déclenché la chute de Ben Ali. Cet « effet papillon », qui résulte des conditions de vie désespérantes (chômage et prix accrus), peut en annoncer d'autres.

Ivar EKELAND

Vous rappelez-vous de la théorie du chaos ? L'histoire du papillon qui, par un battement d'ailes, déclenche un cyclone dans les Antilles quelques mois plus tard ? On peut dorénavant la remplacer par l'histoire du petit vendeur à la sauvette de Sidi-Bouزيد dont le suicide provoque la chute de Ben Ali en Tunisie, peut-être celle de Moubarak en Égypte, sans que l'on sache où s'arrêtera la cascade des dominos. Ce qui n'aurait dû être qu'un incident de police banal et vite oublié dans une ville de province risque d'entraîner la libération des peuples arabes et de bouleverser l'équilibre géopolitique de la planète.

En fait, l'histoire du papillon est plutôt une fable. Il est vrai qu'à l'échelle du batte-

ment d'ailes, les courants d'air peuvent être chaotiques, c'est-à-dire croître exponentiellement, mais ce qui se passe quand ils grandissent en intensité et interfèrent est



beaucoup moins clair. Après tout, s'il n'y avait pas de papillons, il y aurait quand même des cyclones dans les Antilles. Ce que dit la fable, c'est que si l'on considère un cyclone donné, Katrina par exemple, qui a dévasté la Nouvelle-Orléans, il est impossible de lui assigner une cause digne de l'ampleur de la catastrophe : à chaque instant naissent dans le golfe du Mexique de petites perturbations qui ont vocation à devenir des cyclones dévastateurs, mais à l'échelle de nos observations, il est impossible de prévoir lesquelles y arriveront. En revanche, si l'on considère le phénomène cyclonique dans son ensemble, il est assez bien compris et bénéficie d'une certaine régularité. Les causes et les saisons varient suivant

les régions ; dans le golfe du Mexique, par exemple, la saison s'étend de juin à septembre. En janvier, tous les papillons du monde peuvent se donner la main, personne ne s'en apercevra. En revanche, l'histoire du petit vendeur de Sidi-Bouزيد, elle, est vraie. S'il ne s'était pas donné la mort, Ben Ali serait toujours au pouvoir et je ne serais pas suspendu à Internet pour savoir ce qui se passe en Égypte. Toutefois, comme en météorologie, il y a des causes profondes, qui ne déterminent pas certains événements, mais qui les rendent possibles ou probables.

La première de ces causes est le chômage des jeunes. Dans tout le Maghreb, pour la tranche d'âge de 15 à 29 ans, ce taux est de l'ordre de 30 pour cent. Il est plus élevé chez les instruits : contrairement à ce qui se passe dans les pays développés, vous avez plus de chance de trouver un travail si vous n'avez pas de diplôme que si vous en avez un. Cela reflète la mauvaise qualité des emplois disponibles, la plupart se situant dans des services mal rémunérés, dans le tourisme

notamment, ou dans l'économie informelle. On imagine aisément les frustrations de jeunes gens éduqués, informés de ce qui se passe ailleurs grâce à Internet, et qui n'obtiennent dans leur pays ni pouvoir ni avenir.

A ce facteur, à l'œuvre depuis longtemps, s'est ajoutée cette année la flambée des prix des matières premières. En un an, entre décembre 2009 et décembre 2010, les prix du maïs, du café et du blé ont augmenté de 50 pour cent. Les prix retrouvent leur niveau de 2008, l'année où les émeutes de la faim avaient éclaté au Maroc et en Égypte, ainsi qu'en Indonésie, aux Philippines, à Haïti, et dans beaucoup de pays d'Afrique. On imagine l'effet de ces augmentations sur des populations dont le revenu se situe au minimum de subsistance. Rappelons que l'Égypte, avec 80 millions d'habitants, doit importer la moitié de sa consommation de blé, et subventionne largement les prix intérieurs.

La hausse des produits agricoles n'est pas limitée aux seuls produits d'alimentation : le coton est en tête de liste, avec

120 pour cent d'augmentation, suivi par le caoutchouc, avec 80 pour cent. La question, comme toujours, est de trouver le responsable de ces hausses : s'agit-il d'un déséquilibre entre l'offre et la demande, ou d'un effet de la spéculation financière ? La confiance n'étant pas revenue sur les marchés d'actions ou d'obligations, l'argent qui cherche à se placer se serait reporté sur les marchés de matières premières.

Les discussions font rage entre les spécialistes. Personnellement, je pencherai plutôt pour la première solution. En raison des conditions climatiques, la récolte a été moins abondante que prévu partout dans le monde, dans un contexte de croissance de la demande, la Chine et l'Inde changeant leurs habitudes alimentaires, et de la population. Cette année, la planète franchira le cap des sept milliards d'habitants. On en était à six milliards en 1999, voilà 12 ans. Cela s'appelle une croissance exponentielle. ■

Ivar EKELAND est professeur d'économie.

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Les plantes, des épurateurs de l'air intérieur ?

Pour dépolluer locaux et appartements, les plantes n'ont pas encore fait leurs preuves.

Damien CUNY

Nous passons près de 90 pour cent de notre temps dans des locaux fermés. Or l'air de ces environnements contient divers polluants en concentration d'autant plus élevée que ces locaux sont calfeutrés. Comment lutter contre cette pollution intérieure ? Certains ont proposé d'utiliser des épurateurs végétaux. Voyons en quoi consiste cette méthode de purification de l'air et dans quelle mesure elle peut être efficace.

Les polluants présents dans les habitations sont issus des combustions, des

matériaux d'ameublement ou de construction qui relarguent plus ou moins longtemps des composés volatils utilisés lors de leur fabrication, tel le formaldéhyde, auxquels s'ajoutent des molécules contenues dans la fumée de cigarette (goudrons, aldéhydes, phénols, etc.), des produits d'entretien et de bricolage (le benzène par exemple), etc.

Ces polluants ont des effets à court et à long terme sur la santé, tels qu'irritations des muqueuses, troubles respiratoires, voire cancers, même si l'on ignore souvent quelles sont les doses toxiques et s'il existe des

seuils de toxicité. Les autorités sanitaires, puis le grand public en ont pris conscience : par exemple, l'air intérieur fait l'objet de plusieurs mesures phares du deuxième Programme national santé environnement. Les solutions consistent d'abord à maîtriser les sources de polluants et à aérer régulièrement les lieux pour renouveler l'air. Que peuvent apporter de plus les végétaux ?

Dans les années 1980, les agences spatiales américaine et soviétique ont cherché à utiliser des plantes pour épurer l'air de véhicules spatiaux et de stations orbi-

tales. Différents dispositifs expérimentaux faisaient passer l'air à travers un substrat de plantes, un sol constitué de matières minérales et organiques, éventuellement enrichi en substances adsorbantes, tel le charbon actif.

Dans ces systèmes dits actifs, ou de bio-filtration, les plantes stimulent et entretiennent les micro-organismes du sol en sécrétant par leurs racines des molécules organiques utiles au métabolisme microbien. Les polluants, tels le benzène ou le

1 000 litres, et on les expose durant quelques heures à un polluant gazeux, tel le benzène ou le monoxyde de carbone. Les concentrations en polluants sont souvent supérieures à celles rencontrées dans les bâtiments, et divers paramètres tels que la température, l'humidité ou l'éclairage sont maintenus constants.

Lors de ces tests en laboratoire, les concentrations de polluants peuvent être réduites fortement, par exemple de 100 pour cent pour le monoxyde de carbone. Toutefois, ils ne sont pas représentatifs de la complexité des situations rencontrées dans les locaux, où les polluants se mélangent, où les sources d'émission sont nombreuses et la ventilation plus ou moins efficace.

En fait, les systèmes d'épuration par les plantes, qu'ils soient actifs ou passifs, ont été peu testés dans des environnements réels. D'après les premiers résultats issus de quelques travaux rigoureux disponibles, dont ceux – toujours en cours – réalisés depuis 2004 dans le cadre du programme PHYTAIR par des équipes du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) de Nantes et de la Faculté de pharmacie de Lille, le rendement d'épuration des plantes utilisées en conditions réelles est... inférieur à celui de l'aération !

Pour l'heure, il n'existe donc pas de dispositif végétal capable d'abaisser notablement la concentration des polluants intérieurs. Limiter les sources de polluants et aérer les locaux restent les stratégies les plus efficaces à cette fin.

Néanmoins, les rôles des racines, des micro-organismes associés et du substrat des systèmes actifs et passifs méritent d'être mieux étudiés. Quelle que soit la technique, elle devra faire l'objet d'essais normalisés afin que son efficacité réelle soit quantifiée, y compris vis-à-vis d'expositions prolongées à des mélanges « réels » de polluants faiblement concentrés dans l'air intérieur.

Damien CUNY est professeur à la Faculté de pharmacie de Lille où il est aussi chercheur au Laboratoire des sciences végétales et fongiques.
http://www.appanpc.fr/Pages/article_recherche.php?art=392

LIMITER LES POLLUANTS

et aérer les locaux restent les stratégies les plus efficaces.

trichloréthylène, sont alors fixés par les particules du substrat et sont dégradés par la microflore, entièrement ou partiellement selon le polluant. La diminution des polluants obtenue en laboratoire est parfois très importante. Ainsi, la concentration de l'air en trichloréthylène est réduite de 100 pour cent par biofiltration à travers un substrat planté de scindapsus doré (*Scindapsus aureus*), une plante d'appartement d'origine tropicale.

Reste que différents points nécessitent d'être étudiés, en particulier l'évolution du substrat : en se colmatant avec le temps, il devient moins efficace, car l'air y circule moins bien, et la croissance des micro-organismes est inhibée s'il s'assèche. Il faut aussi vérifier si des polluants secondaires se forment dans le substrat et évaluer le rendement final du traitement.

On s'intéresse également de plus en plus aux systèmes « passifs » que sont des plantes en pot. Dans ce cas, les polluants sont absorbés au niveau des feuilles, par la cuticule et les pores de transpiration, les stomates, et par la couche superficielle du substrat, que l'air pollué traverse.

Ces systèmes passifs ont été testés en laboratoire dans des conditions parfois différentes d'une étude à l'autre, ce qui rend les comparaisons difficiles. Mais le principe est le même : on place des plantes, par exemple le pothos ou la plante araignée (*Chlorophytum comosum*) dans nos travaux, dans une enceinte en verre de 1 à

IRD Éditions Institut de recherche pour le développement

Un éditeur pour le développement

Sociétés, environnements, santé
 N. VERHAZEAUCHT, M.-E. GRUENAN, D. BLEY
 364 p. 38 €

L'énergie dans le développement de la Nouvelle-Calédonie
 Y. LE BARS, E. FAUGÈRE, P. MENANTEAU, B. MOUTON, A. REDACKER, S. VEUT
 472 p. 15 €

La dengue dans les départements français d'Amérique
 R. CORRIEUX, B. PHILIPPON, A. YEBAKIMA
 208 p. 15 €

L'énergie dans le développement de la Nouvelle-Calédonie
 Y. LE BARS, E. FAUGÈRE, P. MENANTEAU, B. MOUTON, A. REDACKER, S. VEUT
 472 p. 15 €

Le Rift est-africain
 B. HIRSCH, B. ROUSSEL
 424 p. 45 €

En vente dans toutes les librairies et par correspondance :
 IRD Diffusion
 32, av. Varagnat - F 93143 Bondy cedex
 Tél : 01 48 02 56 49 Fax : 01 48 02 79 09
 diffusion@ird.fr
www.ird.fr

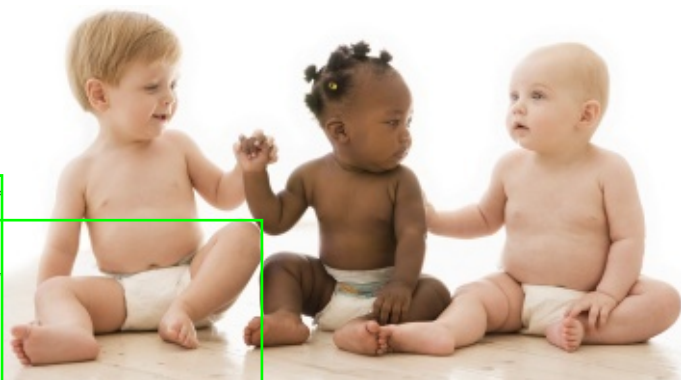
VRAI OU FAUX

Naît-il plus de garçons que de filles ?

Oui, mais on ignore pourquoi. La différence a l'avantage de compenser la mortalité des garçons avant l'âge adulte, supérieure à celle des filles.

Jean-Marc ROHRBASSER

SHUTTERSTOCK/MONEY BUSINESS IMAGES



Aurons-nous un garçon ou une fille ? La probabilité d'engendrer un enfant de l'un ou l'autre sexe est-elle la même ? Ces questions, que beaucoup de couples se posent, sont depuis longtemps objet de curiosité et de recherche.

Le rapport du nombre de naissances masculines à celui des naissances féminines – ou rapport de masculinité à la naissance – est une donnée universelle : il naît environ 105 garçons pour 100 filles. Il est donc vrai que, hors toute intervention d'une quelconque politique concertée, il naît un peu plus de garçons que de filles. Pour quelles raisons ?

En 1662, le démographe anglais John Graunt observe que, de 1628 à 1662, on a baptisé à Londres 139 782 garçons et 130 866 filles (soit 107 naissances de garçons pour 100 de filles), mais il se refuse à émettre des hypothèses explicatives. Il recommande d'interroger les voyageurs pour savoir si le phénomène est observé ailleurs.

En 1710, le médecin anglais John Arbuthnot aborde la question d'un point de vue probabiliste et... théologique. Il suppose qu'une parité des sexes doit exister lorsque les individus atteignent l'âge de se marier. Or à la puberté, les garçons mettent plus leur vie en danger que les filles et ils décèdent en plus grand nombre. Selon l'argument théologique, la nature, gouvernée par la providence divine, répare cette perte en faisant naître un peu plus de garçons que de filles, et ce, dans une proportion presque constante. Arbuthnot utilise 82 années de naissances à Londres, pendant lesquelles le nombre de naissances

masculines a toujours été supérieur, et montre par le calcul que ce phénomène ne peut être dû au hasard. Cette preuve arithmético-théologique est reprise tout au long du XVIII^e siècle et s'enrichit de nombreuses données démographiques venant confirmer le phénomène. Plusieurs causes sont invoquées à l'époque : le différentiel de risque entre les sexes, la situation géographique et climatologique (la chaleur augmenterait les chances d'avoir un garçon), la confession religieuse...

Un fait avéré, sans cause identifiée

Au milieu du XX^e siècle, le sociologue français Maurice Halbwachs en ajoute quelques-unes, dont aucune n'a été validée : des facteurs biologiques (le sexe serait déterminé dans les chromosomes, et non par une combinaison différente de chromosomes sexuels, ce qui est faux), l'état physique et l'alimentation des parents (la quantité de nourriture dont dispose l'embryon *via* la mère), leur âge – celui du père seul, de la mère seule ou de l'un et de l'autre au moment de la conception, la différence d'âge pouvant être un facteur déterminant –, la légitimité ou l'illégitimité de la naissance – la proportion des naissances masculines illégitimes serait un peu plus faible –, et les variations selon le mode de vie, rural ou urbain (il y aurait plus de filles en ville).

Fait intéressant : une étude de la fin du XX^e siècle montre qu'en Europe, il vaut mieux vivre dans un pays du Sud pour avoir un garçon, l'inverse étant vrai en Amérique du Nord.

Cette analyse tord le cou à l'ancien argument selon lequel les chances d'avoir un garçon augmentent dans les pays chauds. Les démographes actuels posent en principe que la valeur du rapport de masculinité à la naissance dépend du rapport de masculinité à la conception et de la mortalité différentielle intra-utérine. Or ces facteurs sont difficiles à mesurer. Les garçons semblent plus fréquemment conçus au début et à la fin du cycle menstruel, et les variations hormonales pourraient influencer sur le sexe de l'embryon conçu.

Aujourd'hui, on ignore encore pourquoi le rapport de masculinité à la naissance est supérieur à un. Toutefois, les chercheurs examinent si le sexe de l'enfant est lié à l'âge des parents et au rang de naissance, la proportion de naissances masculines diminuant à mesure que ce rang augmente. Les rôles des saisons et de l'intervalle entre les naissances sont également étudiés. On se demande aussi si chaque naissance est un événement biologique indépendant : une naissance n'influence-t-elle pas la suivante ?

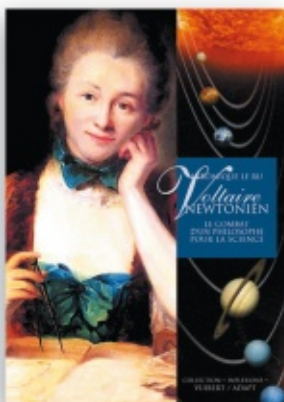
En outre, les registres patronymiques révèlent que, dans certaines familles, les garçons sont plus nombreux ; dans d'autres, ce sont les filles. Y aurait-il donc une composante héréditaire dans le différentiel des sexes ? Enfin, on devrait explorer une piste suggérée dès le XVIII^e siècle : retrouve-t-on chez certains animaux cette légère prédominance des naissances masculines ? ■

Jean-Marc ROHRBASSER est chargé de recherche et directeur des collections de l'Institut national d'études démographiques (INED), à Paris.

SCIENCES 2011 VUIBERT



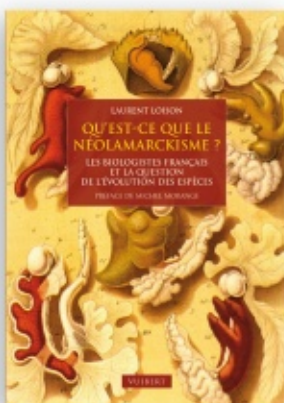
Véronique Le Ru
7-20644, 128 p., 15 €, février 2009



Véronique Le Ru
7-53741, 128 p., 15 €, mars 2005
Coédition ADAPT-SNES



Florian Douam,
Louis-Marie Bobay
0-02201, 128 p., 13 €, octobre 2010
Collection « Va savoir ! »
Ouvrage tout en couleur



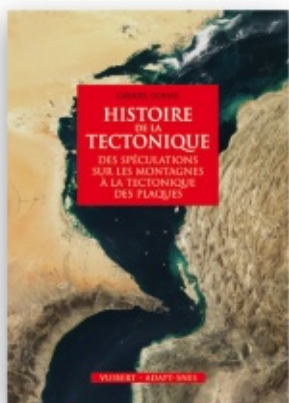
Laurent Loison
0-02300, 256 p., 29 €, août 2010



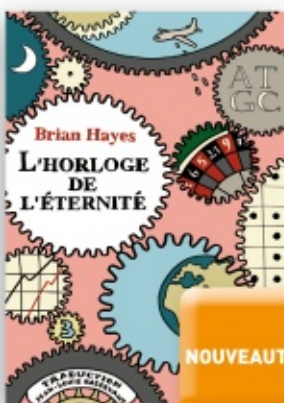
Georges Petavy
0-00245, 208 p., 22 €, avril 2010
Collection « Va savoir ! »



Michel Blay
0-01464, 144 p., 17 €, mai 2010
Collection « Inflexions »
Coédition ADAPT-SNES



Gabriel Gohau
0-00122, 176 p., 22 €, juin 2010



Brian Hayes
0-01129, 240 p., 25 €, octobre 2010



Laurence Maurines
Illustré en couleurs par Olivier Martin
0 01884, 400 p., 42 €, août 2010

Jacques Arnould, Patrick Avel, Anouk Barberousse, Sadek Beloucif, Alain Bernard, Michel Bibbel, Michel Blay, Laura Bossi, Rémi Brague, Sylvie Cadolle, Georges Chapouthier, Patrick Chaquin, Faouzia Charfi, Gilles Cohen-Tannoudji, Olivier de Dinechin, François Euvé, Philippe Huneman, Jean-Paul Jouary, Christian Kasmierczak, Étienne Klein, Rivon Krygier, Marc Lachize-Rey, Marc le Maire, Laurence Maurines, Patrick Mérot, Michel Morange, Jean-Paul Morley, Claire Pettimengin, Nathalie Raybaud, Guy Samama et Odon Vallet.

«Quelle que soit notre philosophie ou notre obédience, nul d'entre nous n'est capable de programmer un ordinateur qui puisse définir le bien et le mal. Lorsque ce "quelque chose" que nous appelons la "conscience" apparaît, ses conséquences sont imprévisibles, avec un énorme pouvoir de faire et le bien et le mal».

Jean-Louis Basdevant,
«Le principe du chat» in *Le grand des hasards*
Entretiens réunis par Jean-François Dars et Anne Papillault, Belin



Véronique Le Ru
0-02423, 128 p., 16 €, octobre 2010
Collection « Inflexions »
Coédition ADAPT-SNES

www.Vuibert.fr





Pour réagir aux articles : courrier@pouirlascience.fr
ou directement sur les pages correspondantes du site www.pouirlascience.fr

✓ QUELLE ACTION POUR LES AXIONS ?

Dans l'article *Matière noire : un univers caché* (Pour la Science n° 399, janvier 2011, <http://bit.ly/pls399-matiere-noire>), les auteurs ne parlent pas des axions, pourtant populaires chez les théoriciens. Que sont ces particules et existe-t-il des expériences qui tentent de les mettre en évidence ?

Martin Schwartz

→ RÉPONSE DE ÉRIC ARMENGAUD

Les axions sont des particules hypothétiques qui ont été introduites pour résoudre un problème de la théorie des interactions fortes (la chromodynamique quantique). L'existence des axions permet d'éviter une trop grande violation de la symétrie dite CP. Ces particules auraient une nature assez particulière (« pseudoscalaire »).

Si leur masse était comprise entre le micro-électronvolt et le milliélectronvolt, elles constitueraient un bon candidat pour expliquer la matière noire, avec des propriétés différentes des WIMP.

L'interaction d'un axion avec le champ magnétique est supposée créer un signal électrique mesurable. On utilise cette propriété pour tenter de les détecter avec de puissants aimants. L'expérience CAST, au CERN, essaye par exemple de détecter des axions qui seraient créés au sein du Soleil. L'expérience ADM X recherche, elle, des axions qui constitueraient la matière noire de la Voie lactée. Elle a déjà permis de poser des contraintes sur la masse des axions pour les modèles de type matière noire.

✓ COULÉES DE LAVE MULTICOLORES

La coulée multicolore présentée dans l'article *Les tunnels de lave* (Pour la Science n° 399, janvier 2011, <http://bit.ly/pls399-lave>) est vraiment surprenante. Qu'est-ce qui explique, ces tons orange, verts et jaunes bien marqués ? Par ailleurs, la minéralogie des tunnels de lave diffère-t-elle de celle d'autres grottes plus classiques ?

Anaïs Joseph

→ RÉPONSE DE MICHEL DETAY

Les mini-coulées rencontrées dans le tunnel de lave de Ferlir, dans le Sud-Ouest de l'Islande, présentent des couleurs uniques. Il ne s'agit pas d'un vernis superficiel, mais bien de couleurs

dans la masse. Cette formation provient probablement du rétrodrainage, en plusieurs phases, d'une poche de lave vers le tube principal. Des mini-coulées successives de lave à des états différents de maturation et d'oxydation, et des vitesses de refroidissement différentes sont sans doute à l'origine de cet étagement surprenant.

Ces tunnels de lave faisant partie du patrimoine national islandais, je n'ai évidemment pas pu prélever d'échantillons qui auraient permis de réaliser des analyses minéralogiques de ces coulées. Cependant, en accord avec Jean-Marie Bardintzeff, je pense que leurs couleurs proviennent principalement de l'état d'oxydation du fer, oscillant du rouge-orangé-jaune à l'état de fer ferrique (oxydé), jusqu'au vert pour le fer ferreux (réduit).

Par ailleurs, la minéralogie des tunnels de lave n'a rien à voir avec celle des grottes « classiques ». Les tunnels de lave sont formés dans la roche volcanique, alors que les grottes habituelles sont formées dans des roches calcaires (sédimentaires). Ces deux environnements géologiques n'ont en commun que la présence de spéléothèmes (de lave ou de calcaire respectivement).

✓ LE CRI DES TORTUES

D'après l'article *La communication acoustique des crocodiles* (Pour la Science n° 399, janvier 2011, <http://bit.ly/pls399-crocodiles>), les cris émis avant l'éclosion par les jeunes crocodiles informent la mère sur l'état de développement des embryons. Chez les tortues, qui sont aussi des reptiles et enfouissent aussi leurs œufs, les jeunes émettent-ils également des signaux acoustiques avant l'éclosion ?

Nicolas Cennac

→ RÉPONSE DE NICOLAS MATHEVON

À ma connaissance, les jeunes tortues n'émettent pas de signaux acoustiques avant l'éclosion, ni après, d'ailleurs. Chez ces animaux, les soins parentaux semblent absents et aucune communication parent-jeune n'a encore été décrite. De plus, les tortues et crocodiles sont assez éloignés phylogénétiquement. Comme expliqué dans l'article, les crocodiles sont beaucoup plus proches des oiseaux, avec lesquels ils constituent le groupe des Archosaures.

Chez certaines espèces de tortues, cependant, l'émission de signaux acoustiques a été



La communication acoustique permet aux jeunes crocodiles de synchroniser l'éclosion.

décrite lors de l'accouplement. Mais on ne sait pas vraiment si ces vocalisations ont valeur de signal, c'est-à-dire si elles portent de l'information. Les tortues n'utilisent donc pas beaucoup l'acoustique pour communiquer.

✓ HABITER LE PERSONNAGE

Merci pour l'article *Les signaux non verbaux de la communication* (Pour la Science n° 399, janvier 2011, <http://bit.ly/pls399-communication>). Certains hommes politiques essaient de corriger leur gestuelle pour renvoyer une meilleure image. Peut-on réellement modifier par l'entraînement les signaux non verbaux que l'on transmet ? Ces changements sont-ils pérennes à long terme ?

Thomas Bauder

→ RÉPONSE DE Y.-A. DE MONTJOYE ET A. PENTLAND

Les signaux honnêtes étant profondément ancrés dans notre système nerveux, il est très difficile de tromper son interlocuteur en les déguisant. Il est cependant possible de les influencer, notamment par un principe d'interprétation théâtrale connu sous le nom de « La Méthode ». Ce principe, développé dans les années 1940 à New York par l'Actor Studio, consiste à faire corps avec un personnage et à expérimenter sa personnalité. En effet, « devenir » un patron pointilleux ou un ami compatissant modifie notre communication non verbale et *in fine* la façon dont un interlocuteur nous perçoit.

Cependant, aller au-delà du jeu d'acteur et vivre son personnage influence notre façon de penser, d'agir et de prendre des décisions. Façonner sa communication non verbale n'est donc pas pratiquer la langue de bois, mais reflète un vrai travail de réinvention de soi.

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**

L'univers des sciences tel que vous ne l'avez jamais vu

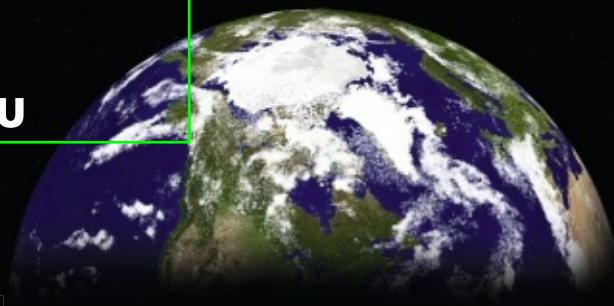
✓ Votre 1^{er} avantage

En vous abonnant au magazine *Pour la Science*, vous accédez tous les mois à une information scientifique de qualité : les chercheurs vous expliquent l'actualité de la recherche internationale.

✓ Votre 2^e avantage : 25% de remise
soit 1 an d'abonnement (12 n^{os})
56€ seulement !

✓ Votre 3^e avantage

Pendant 1 an vous recevez votre magazine chez vous.
Vous pouvez aussi consulter à tout moment
la version numérique sur
www.pourlascience.fr



BULLETIN D'ABONNEMENT

à retourner accompagné de votre règlement à : Service Abonnements • Pour la Science • 8, rue Férou • 75276 Paris cedex 06

POUR LA SCIENCE

☐ Oui, je m'abonne au magazine *Pour la Science* pendant 1 an

soit 12 numéros et leur version numérique au prix de **56€** (au lieu de 74,70€, prix de vente au numéro).

Offre valable uniquement en France métropolitaine. Participation aux frais de port pour l'étranger à ajouter au prix de l'abonnement : France d'Outre-Mer et Europe 12€ - autres pays 25€.

☐ Je préfère m'abonner uniquement à la version numérique du magazine *Pour la Science* pendant 1 an

soit 12 numéros consultables et téléchargeables sur www.pourlascience.fr au prix de **48€** (au lieu de 74,70€, prix de vente au numéro).

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. : _____

*facultatif

☐ Je souhaite recevoir la newsletter *Pour la Science* à l'adresse e-mail suivante :

_____@_____

☐ J'accepte de recevoir également les informations des partenaires de *Pour la Science*.

Je choisis mon mode de règlement :

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

☐ Par carte bancaire

Numéro de carte : _____

Date d'expiration : _____

Cle : _____

les 3 chiffres au dos de votre CB

Signature obligatoire

In application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, il vous suffit de nous prévenir par simple courrier adressé au Service Abonnements.

PLS401

Les neurones sous l'emprise de la lumière

Karl Deisseroth

En associant l'optique et la génétique, les neuroscientifiques contrôlent l'activité électrique de neurones dans le cerveau d'animaux vivants ; ils espèrent pouvoir extrapoler leurs résultats à l'homme pour en apprendre davantage sur les maladies mentales.

Le psychiatre – que je suis – est tous les jours confronté aux limites de son domaine d'activité. En effet, malgré les efforts louables des cliniciens et des chercheurs, on ignore encore certains fondements neurobiologiques des maladies psychiatriques. Cela ralentit le développement de médicaments, alors que ces maladies représentent un problème majeur de santé publique. On a vraiment besoin de nouvelles réponses en psychiatrie. Mais pour les trouver, il faut mettre au point des techniques innovantes d'exploration du cerveau ; je vais vous présenter celle que j'ai développée, l'optogénétique.

En neurosciences, il est difficile de mettre au point des techniques appropriées, car le cerveau des mammifères est complexe. Il contient des dizaines de milliards de neurones interconnectés, ayant de nombreuses caractéristiques distinctes et des modes de décharge électrique différents. Les neuro-

nes communiquent *via* de brefs signaux électriques, de l'ordre de la milliseconde, et une grande variété de messagers biochimiques. À cause de cette complexité, les neuroscientifiques ignorent ce que fait réellement le cerveau, c'est-à-dire comment des décharges électriques spécifiques dans des cellules cérébrales particulières donnent naissance à la pensée, aux souvenirs, à la perception et aux sentiments.

De fait, on ignore aussi comment les défaillances du cerveau produisent des troubles mentaux distincts, telles la dépression et la schizophrénie. Les hypothèses actuelles concernant ces maladies – à savoir des déséquilibres chimiques et des modifications des quantités de neurotransmetteurs – ne rendent pas compte du circuit neuronal électrique. Les traitements sont alors peu spécifiques, bien qu'ils soient souvent utiles.

Ainsi, en 1979, le lauréat du prix Nobel de médecine Francis Crick a suggéré que



© SHUTTERSTOCK/LESION - POUR LA SCIENCE

L'ESSENTIEL

- ✓ Certains micro-organismes utilisent des canaux ioniques activés par la lumière : les opsines.
- ✓ En insérant des gènes d'opsine dans les cellules cérébrales de souris, les neuroscientifiques peuvent contrôler l'activité électrique de neurones spécifiques avec des flashes de lumière.
- ✓ Cette technique n'en est qu'à ses débuts, mais elle améliore déjà nos connaissances sur le fonctionnement du cerveau.
- ✓ Les scientifiques espèrent comprendre les dysfonctionnements électriques et biochimiques associés aux maladies mentales, telles la schizophrénie et la dépression.

le défi majeur des neurosciences serait de contrôler un certain type de cellules cérébrales, tout en ne touchant pas aux cellules adjacentes. Les stimulations électriques avec des électrodes, même intracérébrales, ne permettent pas de relever ce défi : les électrodes sont un outil grossier qui stimule toutes les cellules situées sur le site d'insertion, sans distinguer les différents types cellulaires. En outre, leurs signaux ne peuvent pas inhiber l'activité électrique des neurones – les empêcher d'émettre un signal électrique (on dit qu'ils déchargent) – avec précision.

Plus tard, Crick émit l'hypothèse selon laquelle la lumière pourrait servir d'outil de contrôle, car on sait la délivrer sous forme d'impulsions précises, dans toute une gamme de couleurs. Mais à cette époque, personne ne savait comment faire réagir des cellules à la lumière.

Au même moment, dans un domaine de la biologie éloigné de l'étude du cerveau

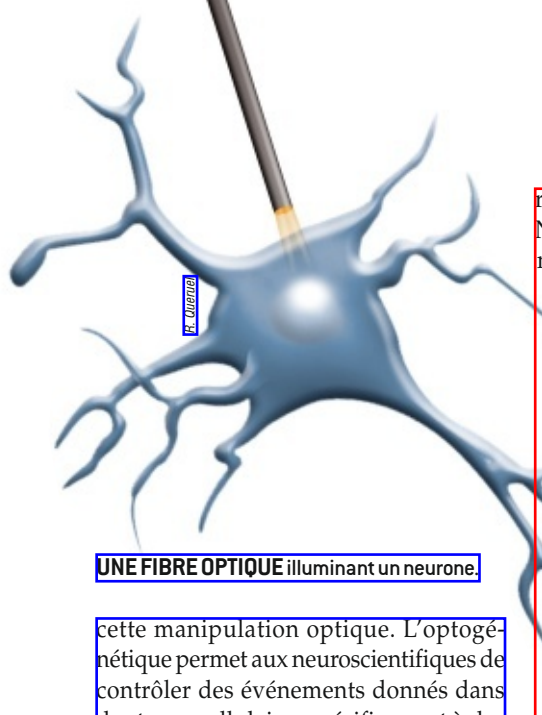
des mammifères, des chercheurs travaillaient sur des micro-organismes particuliers qui utilisent la lumière pour survivre. Depuis 40 ans, les biologistes savent que ces micro-organismes produisent des protéines qui modifient le flux des charges électriques à travers la membrane cellulaire sous l'effet de la lumière.

Ces protéines, produites par un ensemble de gènes nommés opsines, permettent aux micro-organismes d'extraire de l'énergie dans la lumière de leur environnement. En 1971, Walther Stoeckenius et Dieter Oesterhelt, de l'Université de Californie à San Francisco, ont montré que l'une de ces protéines, la bactériorhodopsine, agit comme une pompe à ions, qui peut être brièvement activée par des photons de lumière verte. Puis on découvrit d'autres membres de cette famille de protéines : les halorhodopsines en 1977 et les canaux rhodopsines en 2002 (voir l'encadré page 27).

Avec le recul, il s'avère que la solution de Crick – contrôler les neurones avec la lumière – existait déjà avant même qu'il la formule. Pourtant, il fallut attendre plus de 30 ans pour que ces concepts soient réunis et donnent naissance à une nouvelle technique : l'optogénétique.

Une technique nouvelle en psychiatrie

L'optogénétique associe les outils de la génétique et de l'optique pour contrôler des événements dans toutes les cellules des tissus vivants (et pas seulement celles du système nerveux). Elle comprend la découverte de gènes qui font réagir les cellules à la lumière et leur insertion dans ces cellules ; elle inclut aussi des techniques permettant de délivrer de la lumière dans le cerveau, de cibler les effets de cette lumière sur les gènes et les cellules voulues, et d'évaluer les conséquences de



UNE FIBRE OPTIQUE illuminant un neurone.

cette manipulation optique. L'optogénétique permet aux neuroscientifiques de contrôler des événements donnés dans des types cellulaires spécifiques et à des instants bien précis.

Dans une cellule, un événement n'a de sens que dans son contexte, au milieu d'autres événements, dans le tissu, l'organisme ou même l'environnement. Par exemple, un décalage même faible, de quelques millisecondes, du moment où un neurone commence à décharger pourrait inverser l'effet de son signal sur le reste du système nerveux. Aujourd'hui, des milliers de scientifiques utilisent l'optogénétique pour savoir comment la décharge de neurones spécifiques déclenche une réaction physiologique et un comportement complexes chez des vers, des mouches, des poissons, des oiseaux, des souris, des rats et des singes. Et ces travaux apportent déjà quelques informations intéressantes sur la dépression, les troubles du sommeil, la maladie de Parkinson et la schizophrénie.

La lumière et la vie

En biologie, l'emploi de la lumière pour l'étude des systèmes vivants est ancien. Les chercheurs utilisent depuis longtemps une méthode fondée sur la lumière, nommée CALI, pour détruire ou inhiber des protéines. On a aussi exploité des lasers pour détruire des cellules spécifiques chez le ver *Caenorhabditis elegans*. Inversement, Richard Fork, des Laboratoires Bell dans les années 1970, et Rafael Yuste, de l'Université de Columbia, ont décrit en 2002 comment stimuler des neurones avec des lasers. Mais ces techniques avaient un inconvénient : elles détruisaient les membranes cellulaires.

Depuis une dizaine d'années, les équipes de Gero Miesenböck, du Centre de

recherche sur le cancer Sloan-Kettering, à New York, et de Ehud Isacoff, Richard Kramer et Dirk Trauner, à l'Université de Californie, à Berkeley, ont utilisé des systèmes à plusieurs composants pour moduler des cellules ciblées avec de la lumière. Par exemple, ils ont introduit dans des neurones une protéine qui régule l'activité électrique et une substance qui fait réagir cette protéine à un rayonnement ultraviolet.

Cependant, ces méthodes reposant sur plusieurs composants – que l'on introduit dans les cellules cibles – présentent des difficultés pratiques et n'ont pas eu beaucoup d'applications chez les mammifères. Il était nécessaire de trouver une stratégie n'utilisant qu'un seul composant. C'est là qu'interviennent les protéines de micro-organismes activées par la lumière : les bactériorhodopsines, les halorhodopsines et les canaux rhodopsines.

En 2000, des chercheurs de l'Institut Kasuka de recherche sur l'ADN, au Japon, publièrent en ligne des milliers de nouvelles séquences génétiques provenant de l'algue verte *Chlamydomonas reinhardtii*. En examinant ces séquences, Peter Hegemann, de l'Université Regensburg à Berlin, qui avait prédit que *Chlamydomonas* devait avoir un canal ionique activé par la lumière, trouva

participent aux réponses activées par la lumière de *Chlamydomonas*. Cependant, la découverte de ces canaux rhodopsines n'a pas fait immédiatement progresser les neurosciences, pas plus que ne l'avaient fait les découvertes des bactériorhodopsines et des halorhodopsines lors des décennies précédentes.

Un canal opsine dans les neurones

Beaucoup de scientifiques avaient pourtant envisagé d'insérer des gènes d'opsines bactériennes ou provenant d'algues dans des neurones pour contrôler ces derniers avec de la lumière. Mais ils avaient vite abandonné l'idée : il y avait peu de chances que les cellules animales fabriquent ces protéines microbiennes avec efficacité et sûreté, et il était presque certain que les protéines, même si elles étaient synthétisées, seraient inefficaces. En outre, pour absorber les photons, ces protéines nécessitent un cofacteur, un composé apparenté à la vitamine A et nommé tout-trans rétinol. Le risque de perdre du temps et de l'argent était important...

Néanmoins, pour mon équipe de bio-ingénierie à l'Université Stanford, améliorer notre compréhension de la psychiatrie clinique justifiait un tel risque. Lors de mon internat en psychiatrie, j'avais été le témoin des faiblesses et des effets secondaires

L'OPTOGÉNÉTIQUE PERMET AUX NEUROSCIENTIFIQUES de contrôler des événements donnés dans des types cellulaires spécifiques et à des instants bien précis.

deux longues séquences semblables à celles qui codent la bactériorhodopsine. Il en obtint des copies auprès de l'Institut Kasuka et, en 2002, avec Georg Nagel, de l'Université de Francfort, ils décrivent leur découverte : l'une de ces séquences code un canal membranaire, formé d'une seule protéine et sensible à la lumière bleue. Quand ce canal est éclairé par de la lumière bleue, il régule le flux des cations (des ions chargés positivement). La protéine codée fut nommée canal rhodopsine 1 (ou ChR1).

En 2003, P. Hegemann et G. Nagel étudièrent l'autre séquence et nommèrent la protéine codée canal rhodopsine 2 (ou ChR2). Au même moment, John Spudich, de l'École de médecine de l'Université du Texas à Houston, montra que ces gènes

néfastes des traitements des maladies mentales, telle la thérapie par électrochocs.

Ainsi, en 2004, nous avons introduit le canal rhodopsine 2 dans des neurones de mammifères en culture grâce aux techniques classiques de transfection ; en d'autres termes, nous avons épissé, c'est-à-dire associé, le gène codant le canal rhodopsine 2 avec un type spécifique « d'interrupteur » neuronal, ou promoteur, et nous avons introduit ce matériel dans l'ADN d'un vecteur, tel un virus inactivé, qui l'a transporté dans les neurones. Le promoteur fait en sorte que seuls les neurones sélectionnés (par exemple ceux qui sécrètent le neurotransmetteur glutamate) expriment, ou fabriquent, l'opsine correspondant au gène introduit.

LES OPSINES, DES PROTÉINES SENSIBLES À LA LUMIÈRE

Certains types d'algues et d'autres micro-organismes synthétisent des protéines, nommées opsines, qui réagissent à la lumière visible. Lorsqu'elles sont exposées à la lumière, ces protéines – qui sont en fait des canaux membranaires – régulent le flux des ions chargés à travers les membranes, ce qui permet aux cellules d'extraire de l'énergie de

leur environnement. Les opsines n'ont pas toutes la même sensibilité à la lumière ni le même comportement. Les gènes d'opsines qui produisent ces protéines sont le fondement de l'optogénétique, technique que les neuroscientifiques utilisent aujourd'hui pour contrôler l'activité électrique de neurones ciblés.

Micro-organisme



Chlamydomonas reinhardtii est une algue unicellulaire mobile, dotée d'une paire de flagelles qui lui permettent de se déplacer dans l'eau douce.



Volvox carteri est une algue proche de *Chlamydomonas*, mais elle est constituée de centaines de cellules vivant ensemble et formant une colonie.



Natronomonas pharaonis est une archéobactérie qui ne peut vivre que dans des eaux saturées en sel.

Habitat



Les sols et les étendues d'eau douce partout dans le monde.

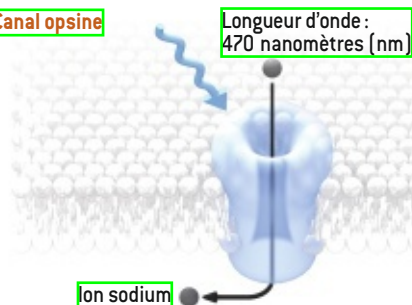


Les étangs, les lacs et les étendues d'eaux stagnantes.

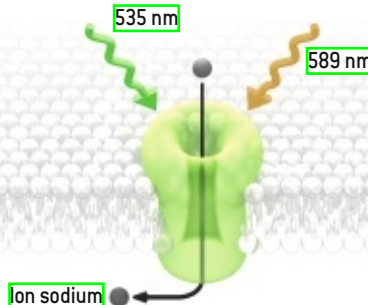


Les lacs salés en Égypte et au Kenya.

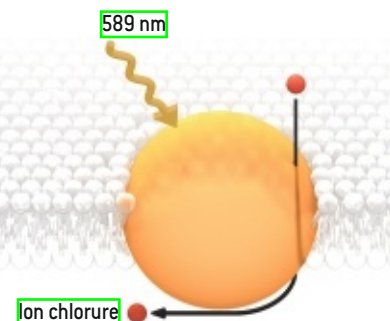
Canal opsine



Le canal rhodopsine ChR2 permet le passage des ions sodium en réaction à la lumière bleue.

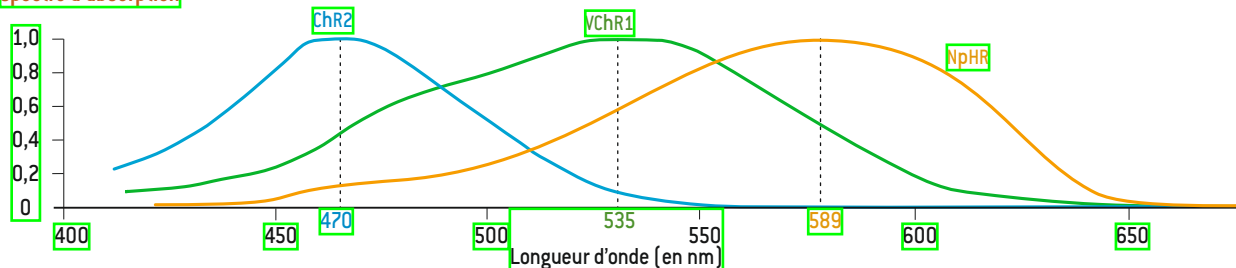


Le canal rhodopsine VChR1 réagit à la lumière verte et jaune.



La halorhodopsine NpHR régule le flux des ions chlorure en réaction à la lumière jaune.

Spectre d'absorption



L'illustration, Medix Pictures, E. Stiller, New York Times/Redux Pictures, United Nations/Alamy, Optogenetic stimulation of neural circuits, technology to probe mammalian brain structures, F. Zhang et al., Nature Protocols, février 2010 (canaux à spectres d'absorption), Illustrations: Brad Christie

Cette expérience a été un succès. En utilisant des impulsions de lumière visible, nous avons contrôlé précisément, à la milliseconde près, la décharge de potentiels d'action – les impulsions électriques qui permettent à un neurone de transmettre de l'information à un autre – de groupes de neurones. Les potentiels d'action sont créés par des échanges d'ions de part et d'autre de la membrane des neurones, *via* différents canaux et pompes. Les opsines (des canaux ioniques), ainsi produites par les neurones, interviennent dans la production des potentiels d'action. En août 2005, mon équipe publia un premier rapport montrant qu'en introduisant un seul gène d'opsine microbien dans des neurones de mammifères, nous pouvions rendre ces cellules sensibles à la lumière.

Les canaux rhodopsines, mais aussi la bactériorhodopsine et les halorhodopsines, sont tous capables d'exciter ou d'inhiber des neurones (en modulant leur activité électrique), avec efficacité et sûreté, en réaction à la lumière. Et ce, car tous les tissus de mammifères contiennent naturellement de grandes quantités de tout-trans rétinol, le cofacteur chimique nécessaire pour que les photons activent les opsines microbiennes. L'ajout d'un seul gène d'opsine aux neurones ciblés suffit.

En 2006, nous avons nommé cette approche l'optogénétique. Depuis lors,

de nombreux laboratoires dans le monde l'emploient, en utilisant les différentes versions de ces gènes que nous avons synthétisées pour travailler de façon optimale sur les cellules de mammifères. À ce jour, environ 700 laboratoires utilisent ces gènes.

L'ingénierie des opsines

Le nombre d'outils en optogénétique, ainsi que leurs applications, se sont vite multipliés. Les scientifiques recherchent de nouvelles opsines dans la nature; grâce à l'ingénierie moléculaire, ils modifient aussi les opsines connues pour qu'elles soient utilisables de différentes façons avec davantage d'organismes (*voir l'encadré page 30*).

Par exemple, en 2008, nous avons trouvé dans le génome d'une autre espèce d'algue, *Volvox carteri*, un troisième canal rhodopsine (VChR1), qui réagit à la lumière jaune et non à la bleue. En utilisant ce canal avec les autres canaux rhodopsines, nous pouvons contrôler simultanément différentes populations de cellules, la lumière jaune modifiant certaines d'entre elles et la lumière bleue d'autres. Et nous avons découvert que le canal rhodopsine le plus efficace est en fait un hybride de VChR1 et de ChR1. Nos

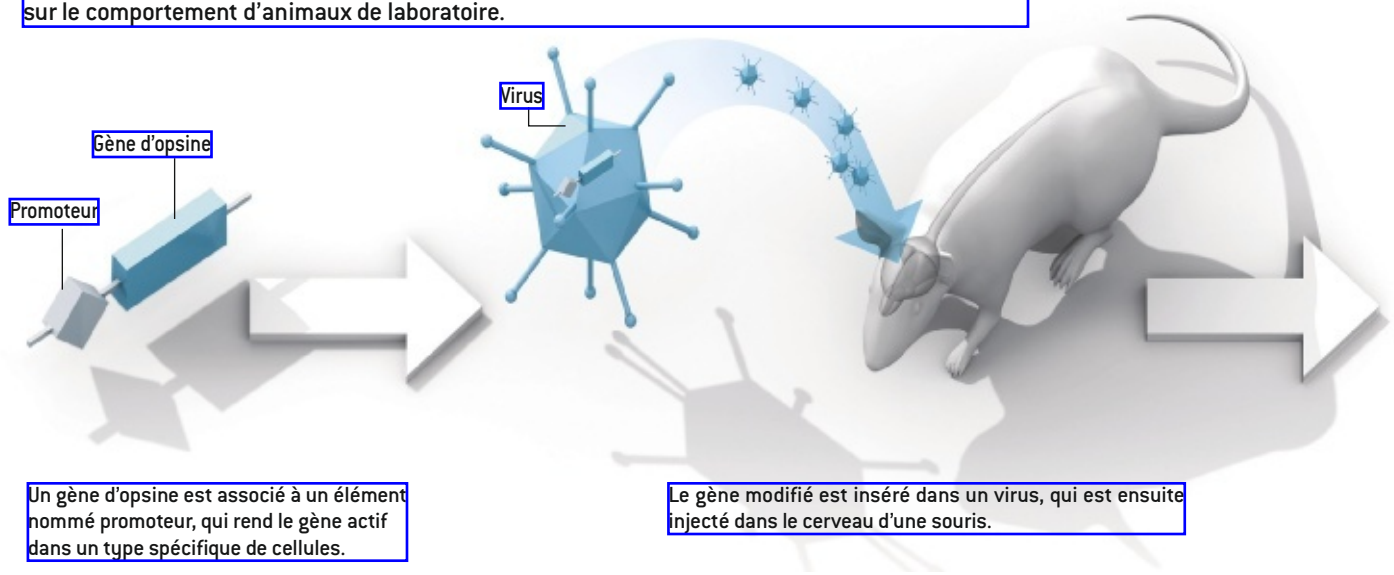
autres opsines modifiées sont des mutants ultrarapides et ultralents du canal rhodopsine ChR2: ils contrôlent de façon très sensible l'émission et la durée des potentiels d'action. Les premiers déclenchent des potentiels d'action plus de 200 fois par seconde, tandis que les seconds placent les cellules dans des états d'excitation stables (ayant une fréquence de décharge plus faible). Les opsines les plus récentes réagissent maintenant à la lumière rouge, proche de l'infrarouge; cette lumière est mieux focalisée, rentre plus facilement dans les tissus et est bien tolérée.

L'ingénierie moléculaire a aussi permis d'étendre le contrôle optogénétique au-delà de l'activité électrique des cellules, jusqu'aux réactions biochimiques. Une grande partie des médicaments que l'on connaît agit sur une famille de protéines membranaires nommées récepteurs couplés à la protéine G. Ces protéines détectent les signaux chimiques extracellulaires, telle l'adrénaline, et réagissent en modifiant les signaux chimiques intracellulaires, tels les ions calcium qui participent à l'activité électrique des cellules.

En ajoutant le domaine sensible à la lumière d'une molécule de rhodopsine à des récepteurs couplés à la protéine G, Raag Airan et d'autres chercheurs de mon laboratoire ont développé un ensemble

FAIRE RÉAGIR LES NEURONES À LA LUMIÈRE

Pour les études utilisant l'optogénétique, les neuroscientifiques insèrent des gènes d'opsines dans des cellules cérébrales grâce à des virus modifiés. Ils peuvent alors déclencher une activité électrique neuronale à la demande, avec des flashes de lumière, et observer leurs effets sur le comportement d'animaux de laboratoire.



de récepteurs, nommés optoXR, qui réagissent rapidement à la lumière verte. Quand des virus insèrent le matériel génétique de ces récepteurs dans le cerveau de rats de laboratoire, les optoXR nous permettent de contrôler des événements biochimiques chez ces rongeurs tandis qu'ils se déplacent dans une cage (pour ce faire, on implante une fibre optique dans leur cerveau, voir l'encadré ci-dessous). Désormais, un contrôle optique rapide et spécifique des voies biochimiques est donc possible, à la fois *in vitro* et *in vivo*.

Beaucoup de gènes d'opsines naturelles découverts dans différents génomes de micro-organismes ne sont pas correctement exprimés par les cellules de mammifères. Mais nous avons développé différentes stratégies pour améliorer leur production et leur expression. Par exemple, nous avons associé les gènes d'opsine à des fragments d'ADN qui servent de « code postal » : ils font en sorte que les gènes d'opsines soient transportés là où ils sont utiles dans les cellules de mammifères afin qu'ils soient bien traduits en protéines fonctionnelles.

Qui plus est, nous avons créé en 2006 et en 2007 des outils fondés sur les fibres optiques, qui envoient de la lumière dans n'importe quelle région du cerveau – superficielle ou profonde – chez des mammifères se déplaçant librement. Et

pour voir en même temps les signaux électriques dynamiques obtenus par contrôle optogénétique, nous avons développé des instruments qui associent des fibres optiques et des électrodes.

Bientôt, nous espérons stimuler optiquement des neurones tout en enregistrant leur activité électrique, car nous pouvons organiser ces deux techniques sans qu'elles interfèrent. Par exemple, nous savons observer l'activité électrique des circuits neuronaux impliqués dans le contrôle moteur et modifiés avec des opsines microbiennes.

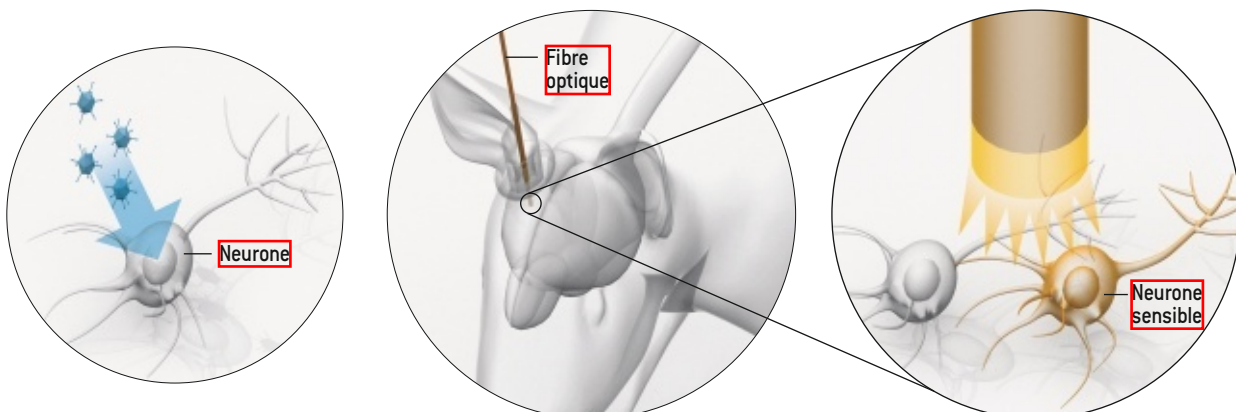
Contrôler l'esprit pour mieux le soigner

Plus les contrôles optogénétiques et les activités électriques des circuits neuronaux deviendront complexes, plus nous irons vers une forme d'ingénierie « inverse » de la machinerie neuronale : nous serons capables de déduire les fonctions des circuits neuronaux à partir de la façon dont ils réagissent aux signaux optogénétiques. Cette ingénierie inverse de circuits neuronaux sains nous permettra peut-être de déterminer quelles propriétés et quelles activités diffèrent dans les cas de maladies psychiatriques et neurologiques. Cela nous aidera à trouver comment rétablir ces circuits.

L'AUTEUR



Karl DEISSEROTH, professeur de psychiatrie et de bio-ingénierie, dirige le Laboratoire de bio-ingénierie de l'Université Stanford, aux États-Unis.



Le virus infecte de nombreuses cellules nerveuses, mais à cause du promoteur, seul un type de neurones fabrique l'opsine.

Des fibres optiques insérées dans le cerveau de l'animal y envoient de la lumière et y contrôlent l'activité électrique des neurones sensibles, ceux qui expriment l'opsine.

L'ESPRESSO

L'importance de l'optogénétique en tant qu'outil de recherche, notamment quand elle est associée à d'autres techniques, ne cesse de croître. Ces dernières années, les neurosciences ont fait de nombreux progrès grâce à une technique d'observation du cerveau nommée l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf).

Cette méthode fournit des cartes détaillées de l'activité neuronale en réponse à divers stimulus. Pourtant, l'IRMf montre seulement les modifications des concentrations en oxygène sanguin dans différentes régions cérébrales (plus un groupe de neurones est activé, plus il consomme d'oxygène). Ces variations ne sont qu'une approximation de l'activité neuronale. Alors les signaux de l'IRMf reflètent-ils vraiment des augmentations locales de l'activité neuronale ?

La réponse est oui. En mai 2010, nous avons utilisé l'optogénétique et l'IRMf pour vérifier que l'activation de neurones moteurs engendre bien les signaux détectés par l'IRMf. De plus, l'association de ces deux techniques permet de cartographier avec précision des circuits neu-

ronaux. L'optogénétique permet ainsi de valider et de préciser de nombreuses données scientifiques en neurosciences et en psychiatrie.

« Éveiller » le neurone

De fait, l'emploi de l'optogénétique a déjà des applications chez l'homme. Chez l'animal, nous l'avons utilisée sur un type de neurones (ceux sécrétant le neurotransmetteur hypocretine) dans une région du cerveau impliquée dans un trouble du sommeil, la narcolepsie (les malades sont saisis d'un besoin irrésistible de dormir et « tombent » de sommeil au sens propre). Nous avons montré que des modes de décharge électrique spécifiques de ces neurones déclenchent le réveil. Si nous pouvions cliniquement engendrer cette activité électrique particulière, nous disposerions d'un traitement de la narcolepsie. Et nous savons désormais que des types d'activité spécifiques dans un petit groupe de cellules sont capables de produire un comportement complexe.

Nous avons également déterminé comment les neurones qui fabriquent de

la dopamine donnent naissance au plaisir. Nous avons déclenché par optogénétique différentes décharges électriques dans des groupes bien définis de neurones dopaminergiques chez des souris se déplaçant librement. Et nous avons identifié les motifs de stimulus qui provoquent la sensation de récompense : en l'absence de tout autre signal ou de nourriture (une forme de récompense), les souris séjournaient davantage dans les endroits où leurs neurones dopaminergiques avaient été activés par la lumière. Ainsi, nous pouvons mettre en évidence l'activité électrique cellulaire impliquée dans le processus de récompense normal, mais aussi celle liée aux pathologies du système de la récompense, telles la dépression et la toxicomanie.

En outre, nous avons amélioré notre compréhension de la maladie de Parkinson, qui correspond à une perturbation du traitement de l'information dans certains circuits cérébraux du système moteur. Depuis les années 1990, certains patients souffrant de la maladie de Parkinson ont été traités par une technique nommée stimulation cérébrale profonde :

NATURE ET FONCTION DES OPSINES

Les scientifiques augmentent les possibilités de l'optogénétique en modifiant les gènes des opsines connues et en recherchant ceux d'autres protéines sensibles à la lumière. De nouvelles opsines, dotées des caractéristiques désirées, uti-

lisées seules ou en association, permettent aux chercheurs de comprendre certains mystères biologiques grâce à des expériences autrefois impossibles à réaliser. Voici une liste de certaines opsines, ainsi que leurs applications.

Opsine	Source	Longueur d'onde excitatrice	Application
Mutants ultrarapides du canal rhodopsine ChR2	Algue <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	470 nanomètres (activation maximale)	Utilisées pour obtenir une activation et une inhibition rapides des neurones avec une précision de l'ordre de la milliseconde, jusqu'à 200 fois par seconde.
Mutants ultralents du canal rhodopsine ChR2	Algue <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	470 nm pour l'ouverture du canal 546 nm pour la fermeture de certains mutants	Permettent d'activer les cellules avec seulement quelques flashes de lumière. En raison de leur sensibilité à la lumière, elles sont utiles aux expériences où la lumière doit pénétrer à travers d'importants volumes de tissus [comme dans le cerveau des mammifères].
Canal rhodopsine VChR1	Algue <i>Volvox carterii</i>	535 et 589 nm	Permet d'activer les neurones. Comme VChR1 réagit à la lumière jaune et ChR2 à la lumière bleue, ces deux opsines peuvent être utilisées ensemble pour contrôler simultanément et indépendamment l'activité électrique de différentes populations de neurones.
OptoXR	Synthétique, créée à partir de la rhodopsine et des récepteurs couplés à la protéine G	500 nm	Permet de contrôler rapidement et spécifiquement les voies biochimiques (et non les signaux électriques) de cellules. Ces canaux peuvent être utilisés chez des animaux de laboratoire se déplaçant librement.

un dispositif implanté, semblable à un pacemaker, applique des stimulus électriques oscillants, soigneusement minutés, dans certaines régions cérébrales profondes, tel le noyau sous-thalamique.

Cependant, les promesses de cette technique pour la maladie de Parkinson (et pour d'autres maladies) sont limitées, car les électrodes stimulent les cellules voisines, de façon non sélective, et la connaissance des stimulus à appliquer est incomplète. Nous avons récemment utilisé l'optogénétique pour étudier des modèles animaux de la maladie de Parkinson. Nous avons découvert, par exemple, que la stimulation cérébrale profonde serait plus efficace quand elle cible non pas les cellules, mais les connexions entre neurones – modifiant ainsi les interactions des différentes régions du cerveau. Et nous avons cartographié deux voies dans les circuits moteurs du cerveau ; l'une de ces voies ralentit les mouvements, l'autre les accélère et pourrait contrecarrer certains symptômes parkinsoniens (notamment le ralentissement moteur).

L'activité neuronale des schizophrènes

Qui plus est, nous avons appris comment forcer un type de cellules, les neurones néocorticaux à parvalbumine, à moduler les ondes gamma de l'activité cérébrale (un type d'ondes que l'on enregistre sur les électroencéphalogrammes). Les scientifiques savent que les patients souffrant de schizophrénie ont des neurones à parvalbumine altérés et que les oscillations gamma sont anormales dans la schizophrénie et l'autisme – mais on ignore pourquoi. En utilisant l'optogénétique, nous avons montré que les cellules à parvalbumine augmentent les ondes gamma et que celles-ci, à leur tour, renforcent le flux d'information dans les circuits corticaux.

Or les patients souffrant de schizophrénie traitent mal l'information ; par exemple, un événement banal peut être surinterprété (ce qui donne peut-être lieu à la paranoïa et aux hallucinations). Ces patients souffrent aussi d'une défaillance d'un mécanisme qui permet à chacun de distinguer les voix entendues prononcées par autrui et sa « petite voix intérieure » (les sujets entendent des voix).

Les personnes souffrant des différentes formes d'autisme, quant à elles,

L'optogénétique est-elle éthique ?

Aujourd'hui, l'optogénétique rejoint les techniques de modulation du cerveau, tels les médicaments psychoactifs et les interventions chirurgicales, qui soulèvent des questions éthiques et philosophiques. Cependant, l'optogénétique est plus sûre et moins chargée de considérations éthiques que ces stratégies plus anciennes. La puissance et la spécificité croissantes de l'optogénétique sont associées à sa complexité technique : il serait presque impossible d'utiliser l'optogénétique sur un patient non volontaire ou réticent.

Toutefois, de nouveaux problèmes, plus subtils, naissent de la précision de l'optogénétique. Tous les aspects de la personnalité, les émotions et les sou-

venirs proviennent d'événements électriques et biochimiques ayant lieu dans des groupes particuliers de neurones, selon des schémas temporels précis. Le contrôle de ces composants clés de l'esprit soulèverait quelques questions philosophiques épineuses, allant du fait de savoir quand il est approprié ou justifiable de faire de telles modifications jusqu'à des questions plus abstraites sur la nature même de la personnalité et de la volonté et sur le fait que l'on puisse les modifier.

Les interventions neurologiques fondées sur la chirurgie, des médicaments ou des électrodes sont si grossières que ces questions philosophiques sont plus théoriques que pratiques et n'ont été abordées que

partiellement. Le psychiatre est directement concerné par ce type de questions, car il sait que les traitements à sa disposition sont capables d'influer sur la construction psychique.

Mais les temps changent, comme l'illustre l'incroyable rapidité des progrès en optogénétique. La précision temporelle et cellulaire des interventions humaines dans le cerveau doit faire l'objet d'une réflexion continue et attentive qui implique les citoyens. Reste à expliquer soigneusement aux profanes ce que représentent les expériences d'optogénétique chez l'animal et comment elles peuvent nous aider à mieux comprendre le fonctionnement du cerveau et à traiter les maladies mentales.

traitent également mal l'information : elles ne saisissent pas le sens général des propos qu'on leur tient, car elles se focalisent sur des détails d'objets, de personnalités, de conversations, etc. Ces anomalies du traitement de l'information peuvent perturber la communication et le comportement. Ainsi, une meilleure compréhension de la signification des ondes gamma nous permettrait de mieux aborder ces maladies complexes.

En conséquence, l'ingénierie cellulaire et cette nouvelle technique, l'optogénétique, nous donnent des informations sur les maladies psychiatriques. On peut désormais relier certaines fonctions complexes du cerveau et des comportements aux propriétés électriques de neurones et de circuits neuronaux. Tout cela change notre compréhension de la façon dont fonctionnent les tissus électriquement excitables, qu'ils soient sains ou malades. Et ce, grâce à d'étranges protéines bactériennes qui réagissent à la lumière. L'histoire de l'optogénétique souligne qu'il est important de protéger les niches environnementales rares – où l'on découvre souvent de nouvelles espèces et de nouveaux outils. Qui aurait cru que l'étude d'une molécule extraite d'un micro-organisme donnerait naissance à une nouvelle méthode d'exploration du cerveau ? ■

BIBLIOGRAPHIE

F. Zhang *et al.*, Structures, *Nature Protocols*, vol. 5, pp. 439-456, février 2010.

R. D. Airan *et al.*, Temporally precise *in vivo* control of intracellular signaling, *Nature*, vol. 458, pp. 1025-1029, avril 2009.

V. Gradinaru *et al.*, Optical deconstruction of parkinsonian neural circuitry, *Science*, vol. 324, pp. 354-359, avril 2009.

G. Miesenböck, De la lumière dans le cerveau, *Pour la Science*, n° 376, février 2009.

E. S. Boyden *et al.*, Millisecond-timescale, genetically targeted optical control of neural activity, *Nature Neuroscience*, vol. 8, pp. 1263-1268, septembre 2005.

Des insectes à la photonique

Serge Berthier

Les ailes des insectes présentent des structures qui contrôlent la propagation de la lumière. Les physiciens s'en inspirent pour élaborer de nouveaux matériaux.

Contrôler la propagation de la lumière à l'échelle nanométrique : tel est l'objectif de la photonique, une branche récente (le terme n'a que 20 ans) et prometteuse de l'optique qui a par exemple conduit aux diodes électroluminescentes (LED) et aux fibres optiques structurées. L'élément de base de la photonique est le cristal photonique, une architecture périodique semblable à celle des cristaux minéraux, mais de période beaucoup plus grande, de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres. De telles structures permettent de manipuler les photons, comme un circuit électrique le ferait avec des électrons. Leur réalisation à grande échelle reste cependant problématique, aussi notre équipe s'est-elle lancée, depuis plusieurs années, dans l'étude des cristaux photoniques naturels, très communs dans le monde animal et à l'origine des plus belles couleurs du vivant : ailes et élytres des insectes, écailles des poissons et reptiles, plumes des oiseaux, nacre...

Ces matériaux naturels peuvent inspirer le physicien de diverses façons. Dans un premier temps, il peut tenter de repro-

L'ESSENTIEL

- ✓ Ailes de papillons, élytres de coléoptères, plumes d'oiseaux, écailles de poissons : nombre de matériaux naturels dévient ou polarisent la lumière.
- ✓ Cette faculté est souvent accompagnée d'autres propriétés telles l'hydrophobie, l'absorption lumineuse ou la rigidité.
- ✓ Ces matériaux ont deux caractéristiques communes : ils sont structurés à plusieurs échelles et présentent un certain désordre.
- ✓ Les chercheurs s'en inspirent pour créer de nouveaux matériaux antireflets ou autonettoyants.

© Shutterstock.com

duire telle quelle une structure existante, ou même l'utiliser directement. Nous verrons que certains verres hydrophobes sont ainsi directement inspirés des propriétés des ailes d'un papillon, et que les ailes d'un autre papillon servent de détecteur de vapeur (voir la figure 1). Le physicien peut aussi, après modélisation, modifier la structure initiale pour amplifier un phénomène. Enfin, de l'étude des matériaux naturels, il peut déduire des règles quasi universelles qui régissent le développement des structures naturelles.

La règle première est la multifonctionnalité. Économe en moyens – elle utilise peu d'éléments chimiques –, la nature ne développe pas de dispositif strictement monofonctionnel : elle fait beaucoup avec peu. Comment ? En construisant des matériaux multi-échelle, c'est-à-dire présentant différentes structures selon l'échelle considérée. De cette organisation multi-échelle résulte un désordre structural qui non seulement assure le lien entre les différentes fonctions du matériau étudié (aile de papillon ou autre), mais optimise ces fonctions.

Multifonctionnalité, multi-échelle, désordre et optimisation en moyenne, telles



sont les leçons de la nature que nous allons tenter d'appréhender et d'appliquer. Avant de les examiner de plus près, un petit tour d'horizon de la photonique s'impose.

Lorsqu'une onde lumineuse rencontre un matériau homogène, elle est soit transmise, soit réfléchie, dans une direction et une proportion parfaitement décrites par les lois de la réflexion et de la réfraction, les « lois de Snell-Descartes ». Passée cette frontière, l'onde poursuit sa route en droite ligne jusqu'à l'interface suivante. Manipuler la lumière dans ces conditions ne peut se faire qu'à une échelle macroscopique, par des jeux de miroirs, de prismes, de réseaux...

Autre échelle, nouvelle optique

Tout devient différent lorsque la matière n'est plus homogène, mais présente à l'onde une structure périodique. Cette cohabitation de deux périodes – celle de l'onde et celle de la matière – conduit, sous certaines conditions, à bouleverser la propagation de l'onde. On peut freiner la lumière, la faire tourner à 90 degrés ou lui faire



1. LE PAPILLON MORPHO GODARTI est bleu à l'air pur (indice de réfraction $n = 1$), vert dans une vapeur d'acétone ($n = 1,36$) et marron clair dans une vapeur de trichloroéthylène ($n = 1,48$). La structure interne de l'aile intercale couches d'air et couches solides ; les vapeurs changent l'indice optique des couches d'air, qui modifie le spectre réfléchi par l'aile.



rebrousser chemin. Tout cela n'est possible que lorsque les deux périodes sont sensiblement du même ordre de grandeur, et c'est tout l'enjeu de la photonique : faire de la photonique, c'est structurer la matière à l'échelle de la longueur d'onde, c'est-à-dire de la distance parcourue par l'onde lumineuse durant une période – typiquement une centaine de nanomètres. Disposer régulièrement des objets à cette échelle est problématique dès qu'il s'agit de passer au stade industriel. Or le monde vivant met à notre disposition un nombre considérable d'exemples et de modèles de cette taille. À défaut de savoir les fabriquer, nous pouvons tout du moins les étudier, les modéliser et envisager d'éventuels « transferts technologiques ».

À chaque animal sa structure. Néanmoins, il est possible de faire émerger quelques grandes catégories structurales en déterminant dans combien de directions de l'espace les périodes de ces structures se développent. On distingue ainsi les structures unidimensionnelles, périodiques dans une seule direction de l'espace : ce sont par exemple les empilements périodiques de couches (voir la figure 2a) ou les réseaux

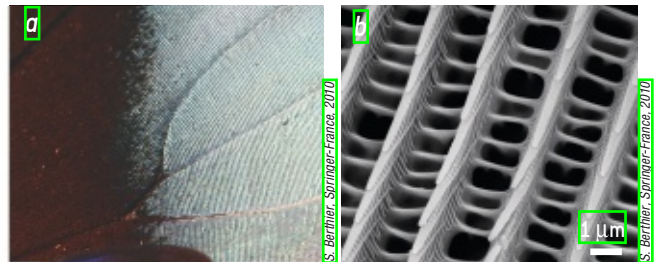
QUELQUES PROPRIÉTÉS DES STRUCTURES PHOTONIQUES NATURELLES

Les structures photoniques naturelles, qu'il s'agisse des ailes ou élytres irisés des insectes ou de l'œil d'un papillon de nuit, ont été sélectionnées au fil de l'évolution pour les atouts qu'elles confèrent à leurs propriétaires. Elles jouent de fait de multiples rôles, une même structure en remplissant parfois plusieurs.

En voici quelques exemples pris chez les insectes, dont certains inspirent déjà les physiciens et les industriels. On pourrait en citer d'autres, dans des domaines différents, tels que l'aérodynamique ou l'hydrodynamique, mais aussi chez d'autres animaux comme les oiseaux, les reptiles ou les poissons.

Propriétés thermiques

Les insectes ne produisant pas de chaleur, ils doivent capter l'énergie solaire pour maintenir une température corporelle optimale. Par leurs propriétés radiatives, les structures photoniques des ailes jouent un rôle fondamental dans ce processus. La forte absorption solaire des zones noires des ailes de nombreux papillons est assurée à la fois par les pigments (des mélanines généralement) et par la structure qui piège les rayons incidents.



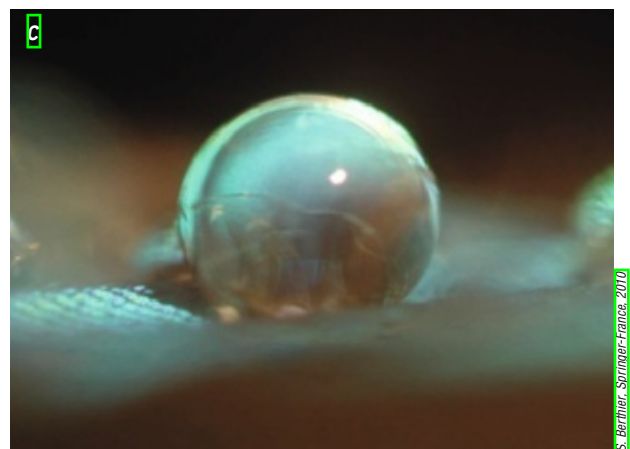
✓ **Absorption lumineuse.** Le lépidoptère *Morpho achilles* absorbe la lumière solaire via les nombreux pigments concentrés dans les zones sombres de ses ailes (a), mais aussi grâce à la structure de ses écailles. Celles-ci sont constituées de stries régulièrement espacées (b). Cette géométrie forme des alvéoles qui laissent pénétrer la lumière solaire jusqu'aux pigments des couches profondes. Malgré sa forte réflectivité dans le bleu, le papillon *Morpho rhenetor* (ci-contre) absorbe lui aussi la chaleur solaire grâce à une structure similaire.

✓ **Rayonnement.** Une surchauffe de l'insecte le conduirait cependant à une mort certaine. La même structure, de par sa composition cette fois, se met à rayonner fortement lorsqu'elle atteint une température trop élevée, ce qui réduit sa température : dès que le papillon est trop chaud, le constituant principal des stries, la chitine, se met à émettre dans l'infrarouge, donc de la chaleur.

Mouillage et adhésion

De nombreux insectes vivent dans des environnements extrêmes, saturés d'humidité (forêts équatoriales) ou au contraire secs et venteux (déserts), qui pourraient vite détériorer les propriétés de leur cuticule, quelles qu'elles soient. D'autant que souvent, les insectes sont incapables d'en assurer eux-mêmes l'entretien. La sélection naturelle a ainsi favorisé les cuticules présentant une couche hydrophobe, autonettoyante ou antiadhésive.

✓ **Hydrophobie.** Les ailes des papillons ne mouillent pas : elles sont superhydrophobes de par leur structure en stries micrométriques. Non seulement les points de contact d'une goutte d'eau avec l'aile sont rares – ce sont les sommets des stries –, mais ils sont constitués de molécules hydrophobes. Ces deux propriétés empêchent l'eau de s'étaler (effet lotus). Non soumise aux forces de contact, l'eau tend à se concentrer en gouttes d'autant plus sphériques que l'hydrophobie est forte (c, sur une aile de papillon *Morpho menelaus*). Elle s'écoule alors le long de la surface, entraînant sur son passage les éventuelles impuretés et saletés rencontrées.



✓ **Élytres autonettoyants et antiadhésifs.** Pour la même raison, les élytres des coléoptères vivant en milieu désertique ne retiennent pas les grains de sable qui recouvrent par ailleurs toute surface exposée. N'adhérant que par quelques points à la surface, les grains sont emportés par le vent et les mouvements de l'insecte.



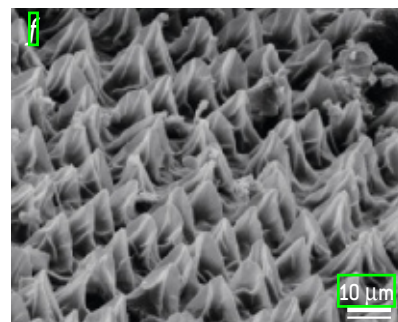
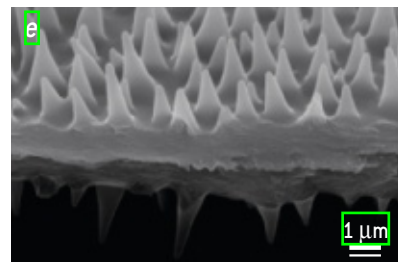
Papillon de nuit



✓ **Vision optimisée.** Un exemple typique de ces structures est la surface externe des yeux à facettes de la plupart des papillons de nuit et de certains papillons diurnes tel *Parnassius apollo* (d). La cornée de chaque facette est constituée d'un assemblage quasi périodique de microrugosités coniques d'une centaine de nanomètres qui crée, à l'échelle de l'onde lumineuse, un gradient d'indice avec l'extérieur : passant progressivement de l'indice de l'air à l'indice de la facette, l'onde est très peu réfléchi. Une telle structure est aussi hydrophobe.

✓ **Absorption solaire.** Les ailes des papillons du genre *Graphium* tel *Graphium weiskei* (e) présentent des structures similaires qui facilitent l'absorption de l'énergie solaire par les pigments des couches profondes en limitant la réflexion des rayons lumineux.

✓ **Camouflage.** La structure en picots pseudoconiques des ailes des libellules (f) les rend très transparentes. Des ailes transparentes sur un corps longiligne, tel est le secret de leur camouflage dans le paysage.



Propriétés mécaniques

Chez de nombreux coléoptères, les ailes antérieures ne participent pas, ou peu et assez indirectement, au vol. Elles ont acquis un rôle de protection du corps par optimisation de la rigidité.

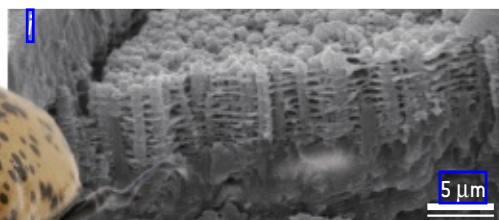
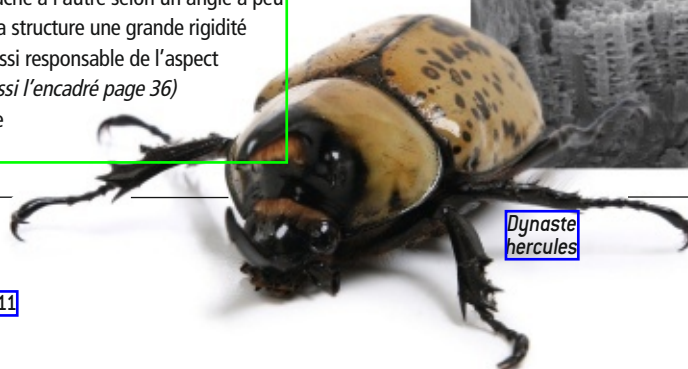


✓ **Rigidité.** L'élément constitutif des élytres des coléoptères (et des ailes des autres insectes) est la chitine, un polymère qui cristallise en de longues chaînes, lesquelles se regroupent pour former des aiguilles rigides, parallèles les unes aux autres. Un tel système est anisotrope : il n'est rigide que selon une direction et plie dans la direction perpendiculaire aux aiguilles. Mais chez de nombreux insectes, les aiguilles, organisées en couches, sont légèrement déviées d'une couche à l'autre selon un angle à peu près constant (g), ce qui assure à la structure une grande rigidité isotrope. Cette organisation est aussi responsable de l'aspect métallique des insectes (h, voir aussi l'encadré page 36) et de la forte polarisation circulaire de la lumière qu'ils réfléchissent.

Couleurs changeantes

De nombreux animaux modifient leur couleur selon des processus variés faisant intervenir soit des pigments (caméléon, sole), soit des structures (coléoptères). Nombre d'insectes changent ainsi de couleur de façon active ou passive. Cette propriété est nommée X-chromie, X représentant la contrainte provoquant le changement de couleur. Les plus répandues sont l'hygrochromie (hygrochromie) et la température (thermochromie).

✓ **Hygrochromie.** Le coléoptère géant tropical *Dynaste hercules* (ci-dessous) offre un exemple classique d'hygrochromie passive. Sous atmosphère sèche, ses élytres sont bruns, tirant parfois sur le vert. Sous atmosphère humide, l'insecte devient noir. Pourquoi ? Parce que ses élytres sont composés de couches assez désordonnées de chitine et d'air. Lorsque l'eau s'infiltre par les failles parfois nombreuses de la surface, l'ensemble devient quasi transparent, laissant la lumière atteindre les couches pigmentaires profondes où elle est absorbée.



DU CRISTAL PHOTONIQUE À LA COULEUR

Un cristal photonique est un matériau périodique dans une, deux ou trois dimensions de l'espace dont la période est un multiple de celle de l'onde lumineuse qui le traverse. Cette relation des périodes confère au cristal photonique des propriétés particulières de réfraction et de réflexion qui font apparaître des couleurs. Voyons comment.

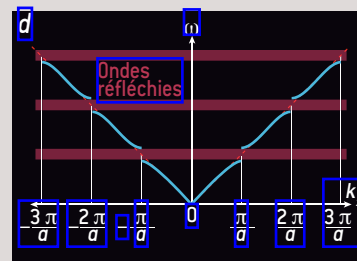
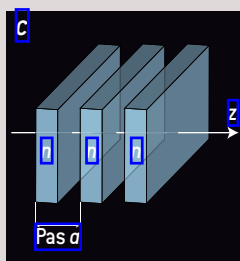
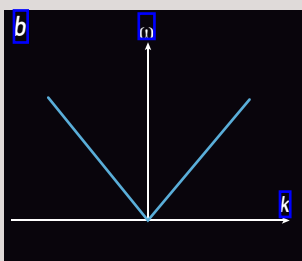
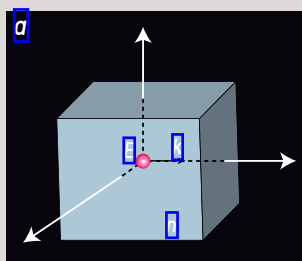
Une bonne manière d'apprécier comment une onde électromagnétique se propage dans un matériau est de calculer ce que l'on appelle la « relation de dispersion ». Cette fonction établit une relation entre l'énergie E du photon

– ou la pulsation ω de l'onde associée –, et la quantité de mouvement du photon – ou le vecteur d'onde $\vec{k}$ de l'onde associée (a). Dans un milieu homogène d'indice n , cette relation prend la forme d'une ligne continue, indiquant ainsi que toute onde peut se propager dans le matériau, quelle que soit sa fréquence (b).

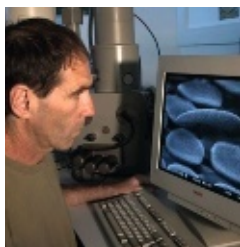
La situation est complètement différente dans un milieu stratifié – un cristal photonique –, où la cohabitation de deux périodes, celle de l'onde électromagnétique et celle de la structure, perturbe la propagation (c). On montre alors que lorsque ces périodes sont éga-

les ou multiples l'une de l'autre, la ligne se brise (d , en bleu), faisant apparaître des bandes de fréquences interdites (en rouge). Les ondes correspondantes ne peuvent se propager dans la structure : elles sont réfléchies à sa surface, lui conférant une couleur.

En outre, le pas apparent du réseau (la distance entre deux éléments de base) dépend de l'angle sous lequel on le regarde. À chaque pas correspond une longueur d'onde réfléchie, et donc une couleur, d'où l'aspect irisé de certains cristaux photoniques : selon l'angle sous lequel on les regarde, on ne voit pas la même couleur.



L'AUTEUR



Serge BERTHIER, professeur à l'Université Paris Diderot, effectue ses recherches à l'Institut des nanosciences de Paris, au sein de l'équipe « Milieux désordonnés multi-échelle : biophotonique, couleur ».

linéaires simples. Viennent ensuite les structures bidimensionnelles, plutôt rares dans la nature, périodiques dans deux directions de l'espace, comme les réseaux croisés (voir la figure 2b). Et enfin les structures tridimensionnelles, semblables – à l'échelle près – à la structure cristalline minérale (voir la figure 2c). Toutes ces structures sont des cristaux photoniques et constituent la brique élémentaire de la photonique.

Plusieurs niveaux d'organisation

Avant d'envisager une transposition de ces structures au monde industriel, il importe de s'interroger sur leur intérêt et leur rôle dans la vie de l'animal. Le plus évident et le plus directement « photonique » est la production de couleurs. Contrairement aux couleurs dues à des pigments, celles engendrées par les structures sont relativement saturées, brillantes et souvent très directionnelles (voir l'encadré ci-dessus). Elles participent notamment à la communication intraspécifique (entre mâle et femelle) ou interspécifique (couleurs avertissantes).

Outre la production de couleurs, les structures photoniques des animaux assurent de nombreuses autres fonctions vitales pour leur organisme, telles l'adaptation à la température extérieure, la protection

du corps ou l'hydrophobie (voir l'encadré pages 34 et 35).

Si l'on procède à un rapide bilan des moyens mis en œuvre par la nature pour réaliser l'ensemble de ces fonctions, on est frappé par l'extraordinaire économie de matériaux utilisés : une phase solide, de la chitine chez les insectes ou de la kératine chez les oiseaux, les poissons et reptiles, deux polymères très proches, et une phase fluide, liquide (eau ou fluide biologique) ou gazeuse (air). D'un point de vue optique, ces matériaux se comportent dans le visible comme des composants diélectriques présentant un faible contraste d'indice de réfraction par rapport à l'air (de 1 pour l'air à 1,6 environ pour la chitine). En d'autres termes, ce sont des matériaux transparents qui modifient d'autant plus le trajet des rayons lumineux qui les traversent que leur indice est élevé. Pourtant, chez l'animal, les couches de chitine ou de kératine suffisent à assurer de manière optimale – la survie de l'organisme en apporte la preuve – l'ensemble des fonctions. Comment un tel exploit est-il possible ? Grâce à la structure bien particulière du matériau sur plusieurs échelles. C'est ce que nous allons explorer maintenant.

À chaque phénomène physique, il est possible de déterminer une taille caractéristique, que l'on peut voir comme l'échelle minimale à laquelle il se pro-

duit. En optique, par exemple, cette taille est celle de la longueur d'onde λ de l'onde lumineuse considérée. Tout objet de taille sensiblement égale à λ , ou $\lambda/2$, $\lambda/4$... interagira fortement avec l'onde et modifiera sa propagation. Dans le domaine du visible humain, l'échelle est la centaine de nanomètres. Pour l'hydrophobie, c'est la dizaine de micromètres : une goutte d'eau de plusieurs centaines de microns de diamètre ne « voit » pas une rugosité micrométrique, mais est fortement affectée par une rugosité plus grande. Une surface hydrophobe et colorée par effet physique présente donc les deux échelles dans sa structure : elle est multi-échelle.

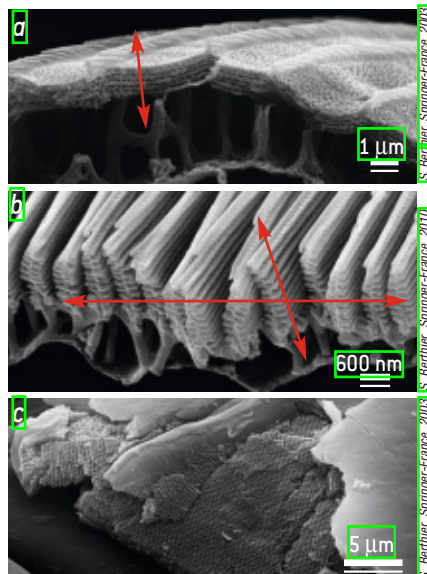
La structure de l'aile du papillon *Morpho menelaus*, par exemple, comporte cinq niveaux d'organisation (voir la figure 3) : les pigments – de grosses molécules que l'on peut mesurer en nanomètres (10^{-9} mètre) –, des lamelles de 100 nanomètres d'épaisseur, des stries distantes d'un micromètre (constituées des lamelles empilées), des écailles d'une centaine de micromètres (formées par l'assemblage des stries), et l'aile elle-même, qui peut atteindre cinq centimètres de la base à l'apex. D'un point de vue optique, chacun de ces niveaux d'organisation influe sur la couleur de l'animal ou plutôt sur certaines composantes du signal coloré, mais quelques-uns sont aussi affectés à une fonction particulière, comme l'hydrophobie ou l'isolation thermique.

Des structures photoniques multi-échelle et multifonctionnelles semblables sont observées chez de nombreux organismes vivants. Les couleurs du colibri, par exemple, sont créées par des interférences à l'échelle de quelques centaines de nanomètres, puis modulées aux échelles supérieures (les barbulles de ses plumes sont hémicylindriques, ce qui donne une très grande directivité à la couleur).

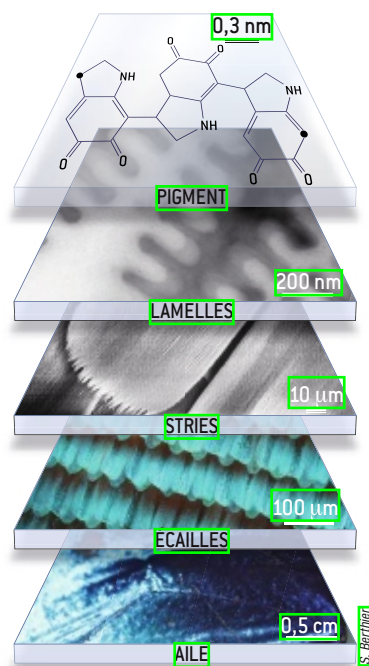
Seconde caractéristique – et seconde leçon – des structures photoniques naturelles : elles sont mal ordonnées, ce qui optimise les diverses fonctions associées aux différentes échelles de structure. Optimiser un système monofonctionnel est simple dans le principe, car toute amélioration du dispositif va dans le bon sens. Il n'en est plus de même lorsqu'il s'agit d'améliorer de front plusieurs fonctions, parfois antagonistes. Quel est le bon équilibre ? Et comment y parvenir ? Le concept n'est pas simple et nous nous appuyerons sur un postulat : la redoutable efficacité de la sélection naturelle.

Pendant des millions d'années, les organismes ont évolué et testé de nouvelles structures, de nouveaux dispositifs, et seules les structures optimales ont perduré jusqu'à aujourd'hui. Cette évolution s'est faite vers une plus grande complexité, vers des structures multi-échelle – parfois même fractales – et mal ordonnées (voir la figure 4), le désordre topologique étant lui-même multi-échelle...

Loin d'être un inconvénient, ce désordre est un atout majeur dans la multifonctionnalité et participe à la robustesse des effets engendrés, c'est-à-dire à leur relative insensibilité aux conditions extérieures. Ce désordre peut être précisément quantifié par une grandeur nommée entropie de configuration, et mis en rapport avec l'optimisation globale de la structure. On observe ainsi que dans les structures naturelles, désordre et optimisation globale sont corrélés : le désordre assure l'optimisation moyenne des fonctions, qui se fait au détriment de l'optimisation de chacune d'elles.



2. TROIS EXEMPLES de structures photoniques chez les insectes : la structure unidimensionnelle de l'écaille du lépidoptère *Urania leilus* (a), la structure bidimensionnelle de l'écaille du lépidoptère *Morpho rhetenor* (b) et la structure tridimensionnelle de l'écaille du coléoptère *Cyphus hancoki* (c).



3. LES CINQ NIVEAUX D'ORGANISATION de l'aile de *Morpho menelaus* influent tous sur sa couleur (de haut en bas) : les pigments absorbent la lumière à certaines longueurs d'onde et, de par leur géométrie et leur dimension, les lamelles créent des interférences, les stries diffractent la lumière, et les écailles et l'aile dispersent les rayons lumineux. De par leur échelle, certaines structures confèrent aussi d'autres propriétés à l'insecte : les stries l'isolent thermiquement, les écailles le rendent hydrophobe et aérodynamique, et les multiples couches qui constituent l'aile augmentent sa résistance.

Imiter les matériaux biologiques

Les structures biologiques tendent vers la complexité pour pallier le petit nombre de matériaux dont elles disposent et leur faible contraste d'indice. À l'inverse, nous disposons d'une large gamme de matériaux (et donc d'indices), y compris complexes. Pour l'heure, cependant, les structures artificielles produites par l'homme restent assez simples, car on sait encore peu de choses sur les propriétés optiques de systèmes multi-échelle construits à partir de tels matériaux complexes. Voici quelques exemples de réalisations bio-inspirées.

De par sa structure bidimensionnelle en « sapin de Noël » très ouverte, l'aile de *Morpho* se prête étonnamment bien à la détection de vapeurs, car l'air s'insinue facilement dans toute la structure. Le spectre réfléchi par l'aile, ou tout simplement sa couleur, dépend à la fois de la structure géométrique – l'épaisseur des couches, que l'on peut considérer comme constante –, et de l'indice de réfraction de ses composants, notamment de l'air intercalé entre les couches d'écailles et entre les stries. En présence de vapeur d'un produit quelconque, l'indice de ces couches d'air est modifié, et la couleur varie. Une analyse des spectres de réflexion

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Berthier, *Photonique des Morphos*, Springer-France, 2010.

M. Elias et J. Lafait (sous la dir.), *La couleur. Lumière, vision et matériaux*, Belin, 2006.

S. Berthier, *Iridescence, les couleurs physiques des insectes*, Springer-France, 2003.

permet, après étalonnage, de distinguer la nature du produit, mais également sa concentration dans l'air (voir la figure 1). Des prototypes artificiels imitant la structure de l'aile fonctionnent, réalisés notamment par l'Institut de recherche pour le génie physique et la science des matériaux, à Budapest, en Hongrie. Il s'agit à présent de concevoir des dispositifs réalisables à l'échelle industrielle.

Une autre propriété convoitée est l'hydrophobie extrême des ailes de la plupart des papillons, souvent plus forte que celle de la feuille de lotus qui a donné son nom à cet effet (voir l'encadré pages 34 et 35). Dans les deux cas, elle est directement liée à la nature multi-échelle de la structure. Avec le laboratoire de *Saint-Gobain Recherche*, nous avons mis au point une technique pour imprimer cette structure sur verre : on applique l'aile sur le verre avant sa solidification, ce qui transfère à ce dernier la superhydrophobie de l'aile. La structure de l'aile du papillon *Papilio ulysse* imprimée sur un verre à carreau ordinaire confère à ce dernier une hydrophobie supérieure à celle obtenue par traitement chimique (voir la figure 5).

Dans un tout autre domaine, la structure bidimensionnelle très particulière qui recouvre les yeux à facettes de nombreux papillons de nuit est à l'origine d'un traitement antireflet très efficace auquel elle a donné son nom : la *moth eye structure* (la structure de l'œil du papillon de nuit). Le traitement antireflet classique de nos optiques (lunettes, objectifs...) se fait par dépôts successifs, sur la surface à traiter, de couches d'indice évoluant de celui de

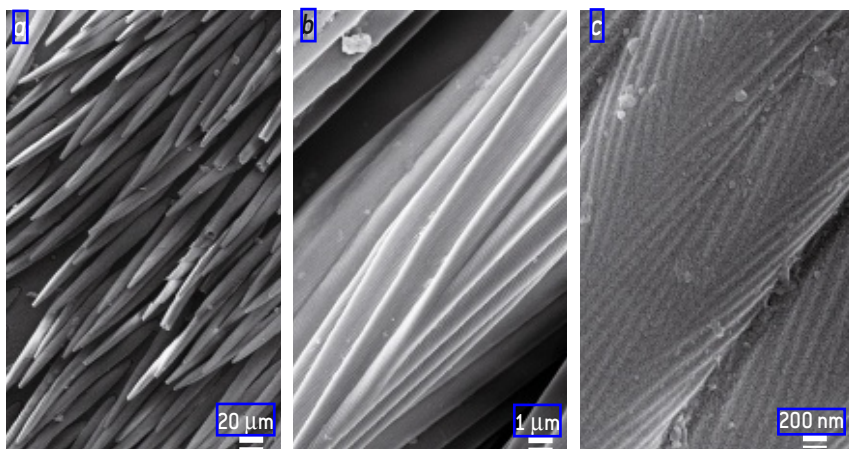
l'air ($n = 1$) à celui du verre ($n = 1,5$), ce qui minimise les réflexions à chaque interface. Efficace, cette technique présente cependant de nombreux inconvénients. Ces couches de matériaux différents, et donc de coefficients de dilatation thermique différents, ont tendance à se décoller en cas de forte variation de température. Il est également difficile d'appliquer un traitement de surface (antirayure, hydrophobie...) du fait de l'incompatibilité des indices. Elle impose par ailleurs l'utilisation de nombreux matériaux.

Un champ de bosses antireflets

Les insectes ont contourné ces difficultés avec une grande économie en développant à la surface de chaque facette (ommatidie) de l'œil une structure quasi périodique de microrugosités sensiblement coniques de 200 nanomètres environ de hauteur et de pas. Cette structure crée un gradient continu d'indice entre l'air et la cornée de la facette (la cornéule) qui annule presque tous les reflets. Assemblés, les picots coniques créent un champ de petites bosses : à l'échelle de l'onde lumineuse qui arrive sur l'œil, tout se passe comme si le matériau constituant la facette se diluait progressivement dans l'air. Arrivant sur un matériau d'indice très proche de l'air, l'onde est principalement réfractée et très peu réfléchie. Une telle structure est aussi hydrophobe, donc autonettoyante.

Des structures similaires ont été reproduites à la surface d'optiques soumises à de fortes variations de température, en particulier dans le domaine spatial : contrairement aux systèmes antireflets classiques, constitués de plusieurs couches qui se dilatent différemment, ces structures sont faites d'un seul matériau, qui est de surcroît celui du support. On sait aussi transposer de telles structures sur des surfaces servant de support à des capteurs lumineux, afin de limiter les réflexions. La technique utilisée est le procédé sol-gel : on fait un moulage de la structure à l'aide d'un gel qui est ensuite porté à l'état solide.

Contrairement aux mammifères, et en particulier aux primates, les insectes sont sensibles à la polarisation linéaire de la lumière, c'est-à-dire à l'orientation du champ électrique de l'onde lumineuse. Cela leur permet d'ajouter dans leur communication visuelle une composante qui échappe à la plupart de leurs prédateurs



4. À L'ÉCHELLE MACROSCOPIQUE, les poils du coléoptère *Celosterna pollinosa sulfurea* sont désordonnés [a], puis la structure devient fractale à plus petite échelle. Chaque poil est structuré par un faisceau de chevrons [b], et chaque chevron de même [c]. Ce désordre structurel à plusieurs échelles optimise à la fois son hydrophobie et sa rigidité.

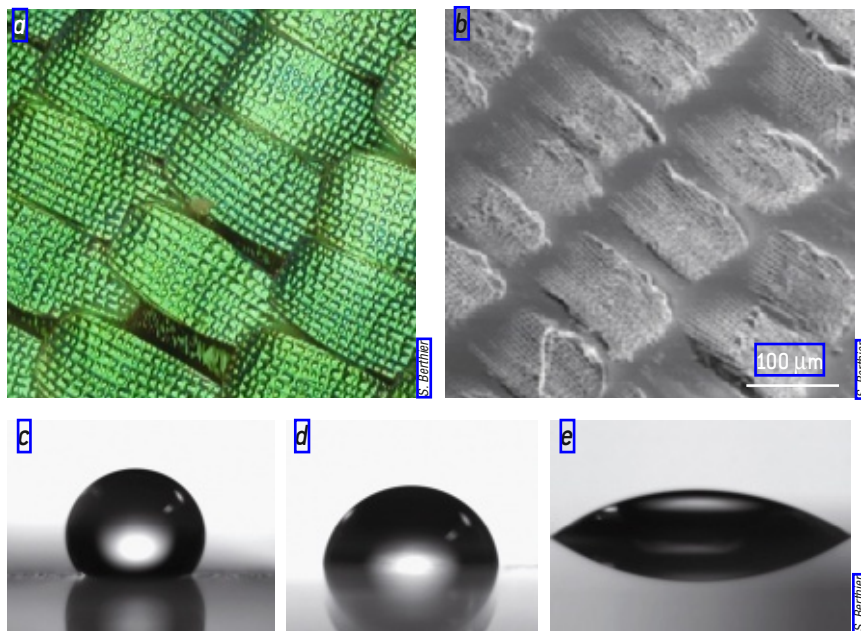
(à l'instar des mammifères, nombre d'oiseaux ne les voient pas). Les chercheurs se sont inspirés de ce phénomène pour développer des motifs antifalsification pour documents ou billets de banque.

Le champ électrique d'une onde électromagnétique est perpendiculaire à sa direction de propagation. Lorsqu'une onde électromagnétique atteint une surface plane, elle se réfléchit différemment selon que son champ électrique est parallèle à cette surface ou, au contraire, dans le plan d'incidence de l'onde (qui est perpendiculaire à la surface). En particulier, il existe un angle d'incidence – l'angle de Brewster, dont la valeur dépend uniquement de l'indice du matériau – pour lequel une onde polarisée selon cette seconde direction n'est pas du tout réfléchi (dans le cas des matériaux biologiques, l'angle est de l'ordre d'une cinquantaine de degrés). Une onde lumineuse quelconque réfléchi sous cette incidence est donc totalement polarisée dans la direction parallèle à la surface et on peut l'éteindre complètement avec un simple polariseur.

Des papillons aux billets de banque

Le phénomène est bien connu des photographes, qui utilisent ce principe pour éliminer les reflets à la surface de l'eau ou du verre. Si la surface n'est plus un simple dioptre, mais une structure multicouche engendrant une couleur par interférences, c'est cette couleur qui sera fortement polarisée et qu'il sera possible de faire apparaître ou disparaître à l'aide d'un polariseur. Sur les écailles du papillon *Papilio ulysses* (voir la figure 5a), par exemple, les côtes des alvéoles qui structurent leur surface réfléchissent une lumière bleue fortement polarisée, que l'on fait disparaître à l'aide d'un polariseur. La teinte vire alors au vert. Des structures de ce type, très délicates à reproduire et optimisées pour renforcer cet effet, sont utilisées pour faire apparaître des motifs cachés sur les billets de banque.

Dans le domaine thermique, enfin, les papillons ont développé un système d'autostabilisation de la température particulièrement ingénieux que l'on essaye de transposer sur des capteurs photothermiques, voire photovoltaïques. Les insectes, comme les capteurs, ne peuvent supporter une surchauffe prolongée et doivent maintenir leur température interne



5. IL EST AUJOURD'HUI POSSIBLE DE TRANSPOSER la structure des écailles du papillon *Papilio ulysses* (a, observées en microscopie optique) sur du verre par impression (b, microscopie électronique). Une goutte de liquide posée sur ce verre (c) est bien plus sphérique que sur un verre traité par voie chimique (d) ou non traité (e), ce qui traduit une plus forte hydrophobie.

en dessous d'une quarantaine de degrés Celsius. Cela est assuré par convection (transport de matière) et conduction vers le milieu extérieur, mais aussi par rayonnement. Par des mesures dans le moyen infrarouge, nous avons montré que la chitine, constituant majoritaire des ailes, présente un fort pic d'absorption des ondes de longueur d'onde comprise entre cinq et dix micromètres, c'est-à-dire en bordure du domaine d'émission thermique optimal de l'insecte. Ce pic agit comme un frein, une butée pour les variations thermiques. Lorsque la température de l'insecte est optimale (vers 40 °C), le pic d'absorption de la chitine ne se superpose pas au spectre d'émission de l'aile; en d'autres termes, la chitine contribue très peu à l'émission thermique de papillon. En revanche, si l'insecte chauffe trop, le domaine d'émission thermique se décale (tout comme une barre de fer chauffée émet des ondes de plus en plus énergétiques, passant du domaine micro-onde à une lumière rouge) et se superpose au pic d'absorption de la chitine: la chitine participe alors à l'émission thermique du papillon, qui augmente, faisant baisser sa température. Lorsque le papillon est suffisamment refroidi, le spectre d'émission est à nouveau décalé par rapport au pic d'absorption de la chitine, et l'émission diminue, ce qui entraîne un réchauffe-

ment. Déplacé vers de plus hautes températures, un tel dispositif permettrait de stabiliser de façon passive la température des capteurs industriels et de prolonger ainsi leur durée de vie.

La photonique des organismes vivants n'intéresse pas seulement le biologiste. Elle fournit un chapitre de science en amont de l'ingénierie et c'est en partie cette science qui inspirera les ingénieurs. Emprunter des idées et des recettes à la nature n'est pas une nouveauté: en fait, il est rare qu'une invention ne soit pas la transposition d'une observation. L'industrie pourrait être intéressée de savoir qu'il n'est pas nécessaire de disposer de colorants pour colorer, et que la clé de cette performance est librement accessible sur les ailes de papillons, les élytres de coléoptères ou les plumes d'oiseaux. Les organismes vivants n'ont pas besoin d'une grande variété de matériaux pour nous fournir une grande variété d'effets visuels, du plus spectaculaire au plus discret. Les secrets de conception résident dans l'hétérogénéité et la complexité géométrique des matériaux.

Les processus qui sous-tendent l'évolution et la sélection naturelle sont des mécanismes puissants, qui favorisent la production d'organes d'une complexité et d'une efficacité étonnantes. De ce fait, les organismes vivants sont une source inépuisable d'inspiration pour l'ingénieur. ■

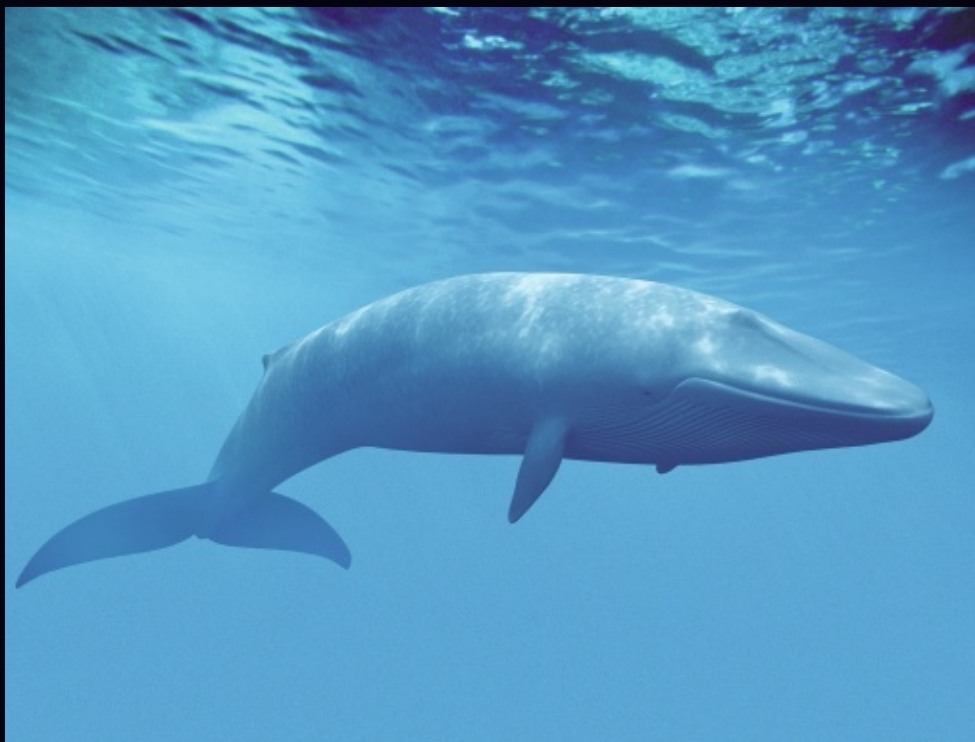
Les baleines engouffreuses

Jeremy Goldbogen

Comment certaines baleines à fanons parviennent-elles à consommer plus d'une tonne de krill par jour ? De nouveaux moyens d'observation ont révélé une biomécanique alimentaire originale.

En pleine mer, un rorqual commun affamé plonge pour effectuer une série d'accélération rapides, la gueule grande ouverte, au milieu d'un banc de petits crustacés pélagiques, le krill. À chacun de ces bonds vers l'avant, la baleine engouffre en quelques secondes une dizaine de kilogrammes de proies, contenus dans environ 70 000 litres d'eau, ce qui représente plus que son propre poids. Pour accélérer, elle fait osciller sa queue et ses nageoires. Lorsqu'elle ouvre sa gueule d'environ 90 degrés, l'eau s'y engouffre. La cavité buccale se distend grâce à des plis cutanés situés sous la tête, qui peuvent s'étirer considérablement. Quand les mâchoires sont refermées, le corps de la baleine prend la forme d'un « têtard boursoufflé ». Mais en moins d'une minute, toute l'eau engloutie est rejetée bouche fermée hors de la poche buccale, qui se dégonfle alors, les proies étant retenues par les fanons, lesquels jouent le rôle d'un tamis.

Ce comportement alimentaire, qualifié de nutrition par engouffrement (*lunge-*



© Denis Scott/Corbis

1. LES RORQUALS (telle cette baleine bleue, *ci-contre*) plongent à plus de 200 mètres de profondeur pour capturer des crustacés planctoniques et des petits poissons. Comme la baleine à bosse, ou mégaptère, ces baleines à fanons sont des « engouffreuses » procédant par accélérations successives. En augmentant leur vitesse et en ouvrant leurs mâchoires, elles emplissent leur cavité buccale extensible de tonnes d'eau de mer. Puis elles filtrent l'eau avec leurs fanons, lames cornées fixées à leur mâchoire supérieure, ce qui leur permet de retenir de grandes quantités de proies.

feeding, où l'anglais *lunge* désigne un brusque mouvement vers l'avant), permet à une baleine d'ingérer plus d'une tonne de krill en plusieurs heures de chasse ininterrompue, assez pour lui donner de l'énergie pour une journée. Paul Brodie, de l'Institut d'océanographie de Bedford, à Dartmouth, en Nouvelle-Écosse (Canada), l'a décrit comme « la plus puissante action biomécanique du règne animal ».

L'étude de ce type d'alimentation a longtemps été restreinte aux observations faites en surface. Ces dernières années, mes collègues et moi-même avons progressé grâce à la collecte de données enregistrées par des capteurs contenus dans des balises fixées sur le dos de rorquals. En particulier, et c'est ce que nous verrons ici, ces capteurs nous ont permis de mesurer les mouvements du corps lors de l'engloutissement de la nourriture. Munis de ces données, nous avons déterminé les forces mises en jeu et estimé la masse d'eau accumulée dans la cavité buccale. Ce faisant, nous avons confirmé des hypothèses reposant sur les seules connais-

L'ESSENTIEL

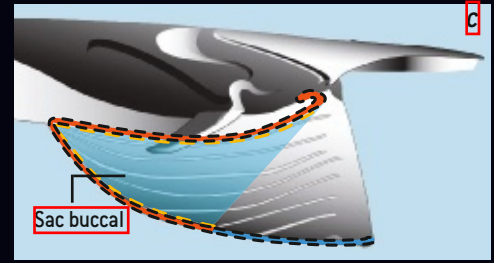
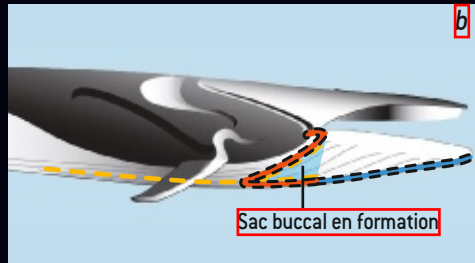
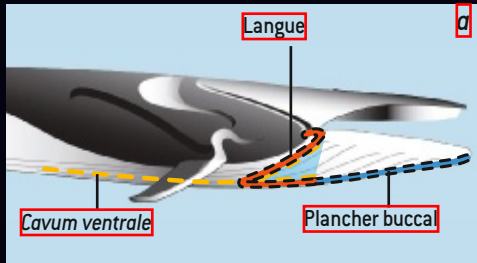
- ✓ Certaines baleines à fanons se nourrissent en profondeur de crustacés et de petits poissons.
- ✓ Elles engouffrent de grandes quantités d'eau de mer, ce qui leur permet de capturer jusqu'à une tonne de nourriture chaque jour.
- ✓ Le mécanisme d'engouffrement a été décrypté en posant sur des rorquals des balises dotées de capteurs.
- ✓ Il s'agit d'un processus actif gourmand en énergie qui oblige la baleine à limiter ses plongées en eaux profondes.

sances anatomiques et les observations en surface. En outre, nos analyses ont permis de découvrir de nouveaux mécanismes d'engouffrement, lesquels, à leur tour, nous ont conduits à étudier les remarquables adaptations morphologiques à l'origine de cet étonnant processus d'alimentation.

Des tonnes d'eau englouties

La stratégie d'alimentation par engouffrement est propre aux Balaenopteridés, une famille de cétacés à fanons, ou mysticètes, dotés d'une nageoire dorsale et qui comprennent la baleine à bosse, ou mégaptère (*Megaptera novaeangliae*), et les rorquals: la baleine bleue (*Balaenoptera musculus*), le rorqual commun (*Balaenoptera physalus*) et quatre autres baleinoptères.

Comme toutes les baleines à fanons, le mégaptère et les rorquals se nourrissent par filtration; ils séparent les petits crustacés et les poissons de l'eau engloutie en utilisant des lames de kératine – la protéine qui constitue les cheveux, les ongles et les



écailles de la carapace des tortues – qui pendent de leur mâchoire supérieure. Les baleines à fanons consomment de grandes quantités de proies, et certaines peuvent atteindre des tailles énormes – elles sont parmi les plus grands animaux qui ont jamais vécu, pouvant atteindre 30 mètres de longueur. Le mode d'alimentation par engouffrement est particulièrement inhabituel non seulement par la masse d'eau engloutie, mais aussi en raison de la biomécanique qui le rend possible.

De la souplesse dans les mâchoires

Nos premiers aperçus sur ce mode d'alimentation particulier sont venus des travaux des cétologues nord-américains August Pivorunas, Richard Lambertsen et Paul Brodie. Leurs recherches se sont focalisées sur les structures anatomiques en action, dont une série complexe d'adaptations morphologiques de la tête, de la bouche et de la gorge.

La tête des baleines engouffreuses apparaît plus reptilienne que mammalienne; sa forme satisfait des contraintes contradictoi-

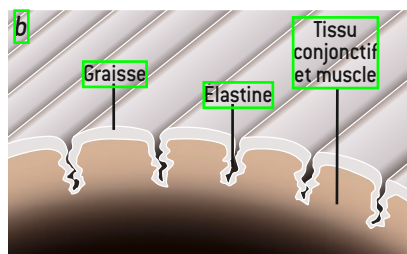
res: l'engloutissement et la locomotion. D'un côté, on a une large bouche dilatable apte à engouffrer un énorme volume d'eau, de l'autre un corps capable de conserver une forme aérodynamique et de soutenir une nage efficace, en particulier au cours de longues plongées et migrations.

Chez les baleines les plus grandes, le crâne et les deux mâchoires inférieures (ou mandibules) sont massifs: ils constituent presque 25 pour cent de la totalité du corps. Les mandibules sont reliées à la base du crâne par de très grands coussinets articulaires constitués d'une matrice dense et élastique de fibres et de cartilage imprégnés d'huile. Ce type d'articulation est propre au mégaptère et aux rorquals, et peut-être aussi à la baleine grise (*Eschrichtius robustus*), qui se nourrit de coquillages et crustacés vivant dans la vase. Ces articulations, attaches flexibles entre le crâne et les mandibules, permettent aux mâchoires de s'ouvrir presque à 90 degrés afin d'engouffrer la plus grande quantité d'eau possible.

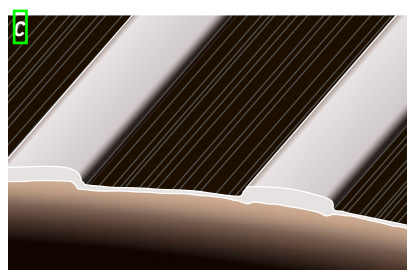
Chez certains mammifères, le point de jonction des mandibules à l'avant, la symphyse mandibulaire, est osseux et

rigide. En revanche, celui des baleines engouffreuses a une composition fibrocartilagineuse qui le rend souple. Grâce à cette troisième articulation flexible, les deux mandibules incurvées peuvent pivoter ensemble vers l'extérieur et augmenter l'ouverture de la cavité buccale. La rotation mandibulaire est régulièrement observée chez la baleine à bosse et les rorquals lorsqu'ils s'alimentent en surface, et aussi chez des individus morts quand les muscles qui maintiennent la mandibule en place se relâchent.

Ainsi, l'articulation particulière de la mâchoire inférieure des baleines engouffreuses leur permet d'augmenter le flux d'eau entrant dans la cavité buccale. Un mécanisme des plus inhabituels facilite ce flux: la langue, flasque et déformable, car composée en grande partie de tissu graisseux élastique, peut s'invaginer dans un espace intramusculaire, le *cavum ventrale*, situé entre la face inférieure de la langue et les parois de la cavité buccale. De la sorte, elle recule vers le nombril pour former un grand sac qui se gonfle d'eau de mer engloutie (voir la figure 3).



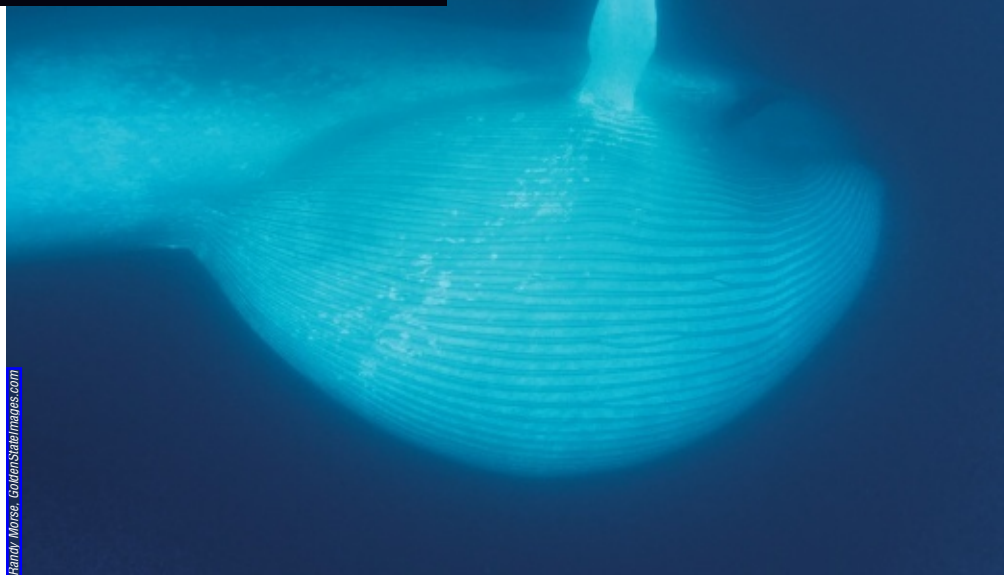
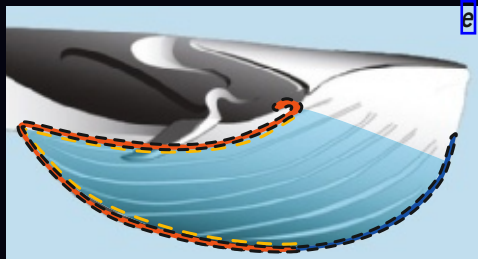
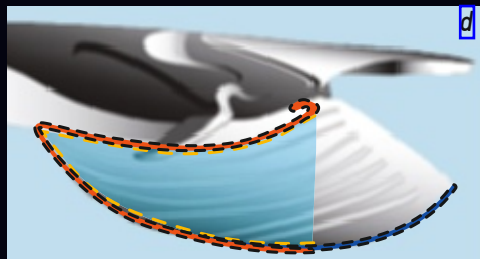
2. LA GRAISSE VENTRALE À SILLONS située sous la cavité buccale d'un rorqual rend cette dernière très extensible. Des lames fermes (a, blanches) sont reliées à de profonds sillons constitués de tissu élastique (a, noirs). La graisse à sillons est constituée de muscle, d'élastine et de graisse (b, en coupe). Des tests mécaniques ont montré qu'elle peut s'étirer de deux fois sa dimension au niveau des sillons élastiques (c).



Une graisse très extensible

Cette distension extrême de la cavité buccale exerce une pression sur les parois du corps qui, chez les cétacés, sont composées de graisse ferme et de tissu conjonctif. Le mégaptère et les rorquals ont dans leur graisse ventrale une série de sillons longitudinaux, ou sillons gulaire, qui s'étendent du museau jusqu'au nombril; le nom «rorqual» vient du terme norvégien *røykval*, qui signifie «baleine à sillons». Cette graisse ventrale à sillons est constituée de lames de texture ferme séparées par des sillons profonds de tissu élastique (voir la figure 2).

Observée en coupe, cette graisse a une architecture en accordéon qui peut facilement se déployer dès que le mus-



Handy Morse. GoldenStateImages.com

cle sous-jacent se relâche. La formidable capacité d'engouffrement de ces baleines dépend ainsi de la morphologie exceptionnelle et du comportement mécanique de la graisse ventrale à sillons.

La première percée majeure concernant la biomécanique de l'engouffrement a été réalisée à la fin des années 1980 par Lisa Orton, de l'Université Duke, à Durham, et P. Brodie.

Ces chercheurs ont récupéré des échantillons frais de graisse ventrale à sillons d'une station de chasse à la baleine de Hvalfjörður, en Islande. À l'aide de tests mécaniques, ils ont découvert que la graisse ventrale à sillons et les couches musculaires associées peuvent s'étendre de manière réversible jusqu'à plusieurs fois leur longueur au repos. Ils ont attribué cette extensibilité extraordinaire aux grandes quantités d'élastine, une protéine élastique spécialisée, présentes dans le tissu, et au fait que celui-ci se déplie comme un parachute lorsque le muscle sous-jacent se relâche.

Mesurer la vitesse de nage

Quand la baleine accélère et abaisse ses mandibules, une pression hydrodynamique est créée dans la cavité buccale et sur son plancher. En théorie, cette pression peut à elle seule engendrer une force suffisante pour distendre la graisse ventrale à sillons et gonfler la cavité buccale, à condition que la vitesse de nage soit suffisamment élevée. L'engouffrement serait alors purement passif.

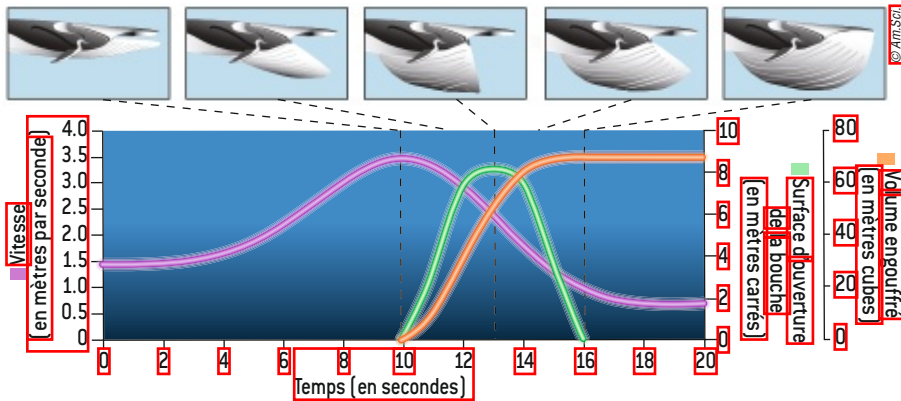
La force nécessaire pour étirer la graisse ventrale à sillons constitue donc un indice de la vitesse à laquelle une baleine doit nager pour que l'entrée d'eau soit massive et qu'un maximum de proies soient capturées. En assimilant la cavité buccale à un cylindre à parois minces, L. Orton et P. Brodie ont calculé qu'une vitesse de trois mètres par seconde suffirait pour remplir

complètement la cavité buccale d'un rorqual commun. Cette prévision concorde avec les observations de surface. Mais jusque récemment, il n'existait aucun moyen de mesurer avec précision la vitesse de nage d'un rorqual en chasse.

Tout a changé lorsque Bill Burgess, de la Société Greeneridge Sciences, à Santa Barbara, a mis au point une balise numérique à haute résolution que l'on peut fixer temporairement sur le dos de baleines lorsqu'elles font surface pour respirer (voir la figure 5). Ces balises, équipées de ventouses de fixation et d'un dispositif de flottaison permettant de les retirer, contiennent divers capteurs, dont un hydrophone, un transducteur de pression et un accéléromètre.

Les données collectées fournissent un aperçu du comportement sous-marin des cétacés : l'orientation du corps, les moments où ils nagent et ceux où ils glissent, et la profondeur de plongée. La mise en place de ces balises, à l'aide d'une longue perche en fibre de verre, n'est cependant pas aisée ; elle nécessite des années d'expérience en mer et un travail coordonné entre un navire de base et un bateau plus petit chargé de la fixation.

3. UNE JEUNE BALEINE BLEUE vient d'engouffrer une masse d'eau riche en krill. Sa cavité buccale est alors gonflée (ci-dessus). Au repos, sa langue (en haut à gauche, a, en rouge) est enroulée le long du plancher buccal (a, en bleu) et le cavum ventrale, un espace intramusculaire, (pointillés jaunes) est « comprimé ». Quand la baleine engloutit de l'eau, sa langue déformable s'invagine à travers le cavum ventrale, et le sac buccal ainsi formé commence à s'étendre et à se remplir d'eau de mer (b, en bleu). À l'ouverture maximale de la bouche, la langue est retournée et s'aplatit pour former une grande partie de la paroi du sac buccal ; le plancher buccal se distend également (c et d). Le volume de la cavité buccale devient alors maximal (e). La baleine chasse ensuite l'eau à travers ses fanons en la pressant de sa langue et de ses mâchoires.



4. LES DONNÉES FOURNIES par des balises électroniques fixées sur des baleines émergeant pour respirer ont permis de détailler les étapes de l'alimentation par engouffrement. Après avoir plongé à une profondeur de plusieurs centaines de mètres, le cétacé accélère dans un banc de krill (ligne violette), ouvre sa bouche (ligne verte), provoquant une grande force de traînée et une décélération. La cavité buccale se remplit d'eau (ligne orange), puis la baleine referme sa bouche, commence à filtrer l'eau et à se préparer pour la capture suivante.

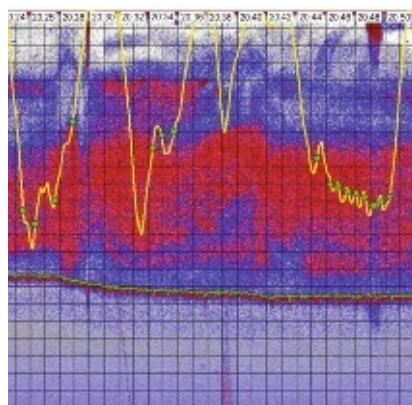
Ces opérations ont été dirigées par John Calambokidis et Greg Schorr, du *Cascadia Research Collective*, une organisation à but non lucratif d'Olympia, dans l'État de Washington, et Erin Oleson, de l'Institution d'océanographie Scripps, en Californie. Menées chaque été depuis 2002 au large des côtes californiennes et du Mexique, elles ont montré que les baleines plongent chaque jour à plusieurs reprises, dans certains cas jusqu'à 300 mètres de profondeur. Au plus profond de chaque plongée, se produit une série d'ondulations, accompagnées de mouvements de nage actifs et d'une diminution concomitante du bruit d'écoulement de l'eau, ce qui indique une réduction rapide de la vitesse.



5. FIXER UNE BALISE ÉLECTRONIQUE sur une baleine en surface n'est pas facile. Ici, une équipe de l'organisation non gouvernementale *Cascadia Research* place une balise sur un rorqual bleu grâce à une longue perche en fibre de verre. Le dispositif de flottaison rouge facilitera sa récupération quand les ventouses de la balise se détacheront du rorqual.

Une nage brusquement freinée

Ces données sont des indices d'engouffrements se produisant en profondeur. Elles ont été validées par un autre type de balise à ventouses : la *Crittercam* du *National Geographic*, conçue et développée par Greg Marshall. La caméra vidéo de cette balise est équipée d'un dispositif à infrarouge, qui filme dans l'obscurité au cours des plongées, et d'un enregistreur du temps et de la profondeur. La vidéo montre la baleine nageant en profondeur à travers des bancs denses de krill. La mandibule de la baleine s'abaisse, puis le bruit d'écoulement diminue, et la graisse ventrale à sillons s'étire. Tout cela fournit une confirmation visuelle du comportement que nous avons interprété à partir des données des balises numériques.



6. LES DONNÉES ÉLECTRONIQUES fournies par une balise fixée à une baleine à bosse montrent que celle-ci a plongé jusqu'à 140 mètres (lignes jaunes, chaque carré représentant 10 mètres) pour se nourrir de krill (en bleu : densité moyenne de proies; en rouge : densité élevée). Cette baleine a réalisé une série d'accélérations (points verts) avant de faire surface pour respirer, chaque plongée durant une dizaine de minutes.

Après des analyses plus poussées, nous avons remarqué que nous pouvions utiliser l'intensité du bruit d'écoulement enregistré par l'hydrophone pour calculer la vitesse de nage du rorqual à chaque fois qu'il se met en chasse. Ce « compteur de vitesse à bruit d'écoulement » a révélé à quel point les changements de vitesse sont rapides lorsque la baleine s'approche de ses proies. La vitesse maximale enregistrée pour les rorquals communs était de trois mètres par seconde, précisément celle qu'avaient calculée L. Orton et P. Brodie.

Les enregistrements ont également révélé qu'une décélération rapide du corps se produit, alors même que la baleine continue à nager activement; cela indique que la baleine subit une puissante traînée lorsqu'elle ouvre largement la bouche – la traînée étant la résultante des forces s'exerçant dans la direction opposée à la progression de l'animal. De l'importance du freinage, on peut déduire non seulement la traînée subie, mais aussi la quantité d'eau engloutie par la baleine (voir la figure 4).

La taille et la forme des mandibules influent sur la taille et le gonflement de la cavité buccale, donc sur la quantité d'eau engloutie et, par conséquent, déterminent l'importance de la traînée. Afin de combiner les mesures morphologiques avec les données de mouvements obtenues grâce aux balises, Nick Pyenson, de l'Institution Smithsonian, Robert Shadwick, de l'Université de Colombie Britannique, et moi-même avons entrepris de mesurer le plus grand nombre possible de spécimens conservés dans des muséums (voir la figure 7).

Nous avons ainsi pu estimer la quantité d'eau engloutie par un rorqual commun à chaque capture de proies. Quand la gueule est ouverte au maximum, la cavité buccale se remplit à une vitesse d'environ 20 mètres cubes par seconde. À la fin d'une capture de six secondes, la masse d'eau accumulée est d'environ 60 tonnes, nouvelle confirmation de la prévision de P. Brodie. Le volume d'eau engouffré a une masse comparable à celle d'un car scolaire, quantité colossale comparée au rorqual commun lui-même, qui pèse environ 45 tonnes.

En engloutissant un volume d'eau de masse supérieure à celle de son propre corps, la baleine subit une énorme traînée contre laquelle elle doit lutter en dépensant beaucoup d'énergie. Par rapport aux situations de nage normale, la traînée est

multipliée par cinq environ, et le travail effectué par l'animal triple.

Le coefficient de traînée mesure l'efficacité hydrodynamique d'un objet. De valeur élevée, il caractérise des formes peu hydrodynamiques. Ses valeurs basses indiquent au contraire que le corps de l'animal fend facilement l'eau. Nos calculs suggèrent que, pendant la durée d'une phase de capture, le coefficient de traînée fait plus que décupler, devenant très semblable à celui d'un parachute qui se gonfle. Cette analogie se comprend : un parachute a besoin d'une traînée pour se gonfler et ralentir sa chute, et la baleine a besoin d'une traînée pour gonfler sa cavité buccale.

Des baleines et des parachutes

Que l'alimentation par engouffrement implique la formation d'une forte traînée nous a conduits, avec R. Shadwick, à une collaboration des plus improbables avec Jean Potvin, un physicien parachutiste de l'Université Saint-Louis, dans le Missouri. Ensemble, nous avons développé un modèle détaillé de ce mode d'alimentation, inspiré de décennies d'études sur les parachutes.

Pour une morphologie et une vitesse initiale données, ce modèle prédit une décélération pour une baleine engloutissant passivement de l'eau et subissant une traînée. En comparant ses résultats aux données empiriques provenant des balises, nous avons testé des mécanismes particuliers d'engouffrement. La première question était la suivante : une baleine en train de se nourrir est-elle comparable à un parachute en train de se gonfler ? Si tel est le cas, la pression du flux d'eau nécessaire pour gonfler passivement la cavité buccale serait atteinte facilement en raison de l'extrême souplesse de la graisse ventrale à sillons.

Nos simulations ont toutefois montré que l'engouffrement passif n'est physiquement possible que pour des angles d'ouverture de la cavité buccale plus faibles et des volumes engloutis plus petits que ceux observés. Deux caractéristiques anatomiques clés ont suggéré un mécanisme d'engouffrement très différent. Plusieurs couches musculaires bien développées sont fermement attachées à la graisse ventrale à sillons des baleines. De plus, une étude réalisée par Merijn

de Bakker et ses collègues de l'Université de Leyde, aux Pays-Bas, a révélé que les muscles et les couches de graisse ventrale contiennent des nerfs sensibles à la tension mécanique. Les mécanorécepteurs sont concentrés dans chaque sillon, précisément la région du tissu qui s'étire au cours de l'engouffrement.

Ces deux indices suggèrent que le mégaptère et les rorquals peuvent « calibrer » la masse d'eau engloutie en fonction de l'étirement de la paroi buccale détecté par les mécanorécepteurs. Il leur est alors possible de produire une force musculaire suffisante pour repousser lentement le flux d'eau entrant. En vertu de la troisième loi du mouvement de Newton, selon laquelle tout corps exerçant une action sur un autre corps subit une réaction d'intensité égale et de sens opposé, la baleine communique sa vitesse de nage à l'eau engloutie ; l'animal ralentit tandis

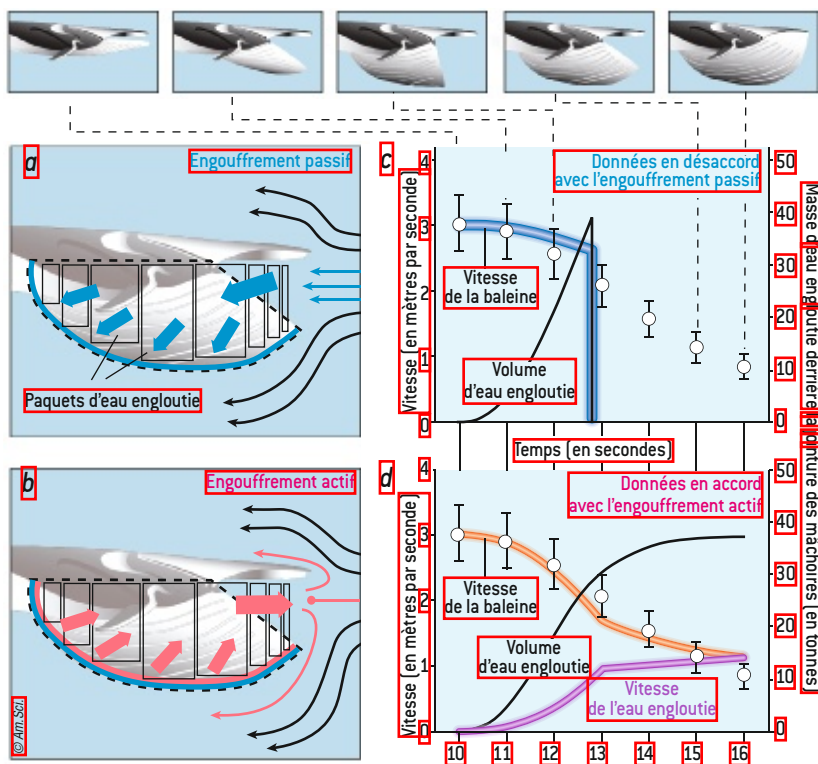
L'AUTEUR



Jeremy GOLDBOGEN, cétologue, est chercheur à l'Institution Scripps d'océanographie de l'Université de Californie, à San Diego.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

UNE BALEINE EST-ELLE UN PARACHUTE ?



Une baleine engouffreuse est-elle semblable à un parachute qui se gonfle passivement d'air ? Élargit-elle sa cavité buccale sous la seule pression de l'eau entrante (a), ou contrôle-t-elle activement ce processus, en utilisant ses muscles pour repousser l'eau vers l'avant (b, en rose) ? Les simulations de trajectoire de la baleine, qui prévoient sa vitesse lors d'un engouffrement passif (c, ligne bleue), ne concordent pas avec les données enregistrées par les balises électroniques (cercles blancs avec les barres d'erreur). En revanche, les simulations de trajectoire lors d'un engouffrement actif (d, ligne orange) correspondent à ces données. La mécanique de l'engouffrement d'une baleine est donc bien différente du déploiement d'un parachute.

que l'eau accélère en pénétrant la cavité buccale, et finalement la vitesse de la baleine et la vitesse de l'eau s'équilibrent.

Les simulations de cet engouffrement actif concordent avec le profil de vitesse provenant des balises numériques (voir l'encadré page 45). Le mécanisme de nutrition par engouffrement diffère donc du gonflement passif des parachutes.

Bien que cela semble aller contre l'intuition, le fait de repousser l'eau vers l'avant au cours d'une capture présente certains avantages. D'abord, la force de traînée subie par la baleine est répartie dans le temps, ce qui la rend plus faible à chaque instant. L'engouffrement actif pourrait aussi accroître le rendement énergétique et mécanique de la filtration par les fanons.

Un filtre autonettoyant ?

En effet, la masse engloutie, à l'intérieur de la cavité buccale, longe la surface filtrante des fanons, et l'on peut penser que la baleine utilise un type de filtration dit tangentiel des particules contenues dans l'eau. Ce type de filtration est par exemple mis en œuvre par des procédés de purification de l'eau, de fabrication de la bière et du vin, de clarification de jus de fruits et de biotechnologies. Il a aussi été observé chez les poissons filtreurs. Par opposition à la filtration frontale, où le flux d'eau est perpendiculaire à la surface filtrante, ce

qui tend à encrasser rapidement le filtre de particules de grande taille, la filtration tangentielle éviterait que le krill ne se coince entre les fanons. Si cela advenait, on voit mal comment la baleine le détacherait de sa langue molle et peu musculeuse. Un jour, la technologie nous permettra peut-être de visualiser le mode de filtration d'un rorqual ou d'une baleine à bosse, ce qui mettrait fin à ces supputations.

La traînée élevée de l'engouffrement actif retentit sur la recherche de nourriture et la morphologie du cétacé. Non seulement la baleine doit dépenser beaucoup d'énergie pour accélérer la masse d'eau qu'elle engloutit, mais la traînée élevée lui fait perdre son énergie cinétique, stoppant presque sa progression. En conséquence, l'animal doit réaccélérer afin d'assurer la phase de capture suivante tout en continuant son apnée. Les engouffreuses épuisent ainsi rapidement leurs réserves d'oxygène et doivent revenir à la surface pour récupérer au bout d'une quinzaine de minutes. Ce laps de temps assez court est inattendu, car ces baleines sont très grandes, et chez presque tous les autres vertébrés respirant à l'air, le temps de plongée augmente habituellement avec la taille, en raison d'un métabolisme plus efficace.

Donald Croll et ses collègues, de l'Université de Californie à Santa Cruz, ont mesuré pour la première fois le temps de plongée d'engouffreuses, en l'occurrence de rorquals, au début des années 2000.

Ils ont fixé de simples enregistreurs de temps et de profondeur sur le dos de baleines bleues et de rorquals communs faisant surface. Les plongées qui impliquaient plus de phases de capture étaient suivies d'un temps plus long de récupération en surface. Ces chercheurs ont donc supposé que chaque phase de capture a un coût énergétique élevé. Cette hypothèse a été étayée depuis lors, non seulement pour les rorquals communs et les rorquals bleus, mais aussi pour les baleines à bosse.

Comme le temps de plongée est limité par son coût énergétique, ces baleines dépendent de la présence de concentrations denses de proies. De plus, on pense que leur morphologie est telle qu'elles peuvent engloutir autant d'eau que possible par plongée ; c'est sans doute pourquoi leur cavité buccale s'étend sur la moitié du corps, jusqu'au nombril, les mâchoires représentant presque le quart de la longueur du corps. Mais alors, l'appareil d'engouffrement ne pourrait-il être encore plus grand ? Quelles sont les limites à sa capacité ? Celle-ci change-t-elle avec la taille du corps ?

Ces questions m'ont conduit à consulter un ensemble de données morphométriques oubliées, provenant de la littérature consacrée à la chasse à la baleine. J'ai ainsi étudié les effets de la taille et de la morphologie sur les performances de la nutrition par engouffrement.

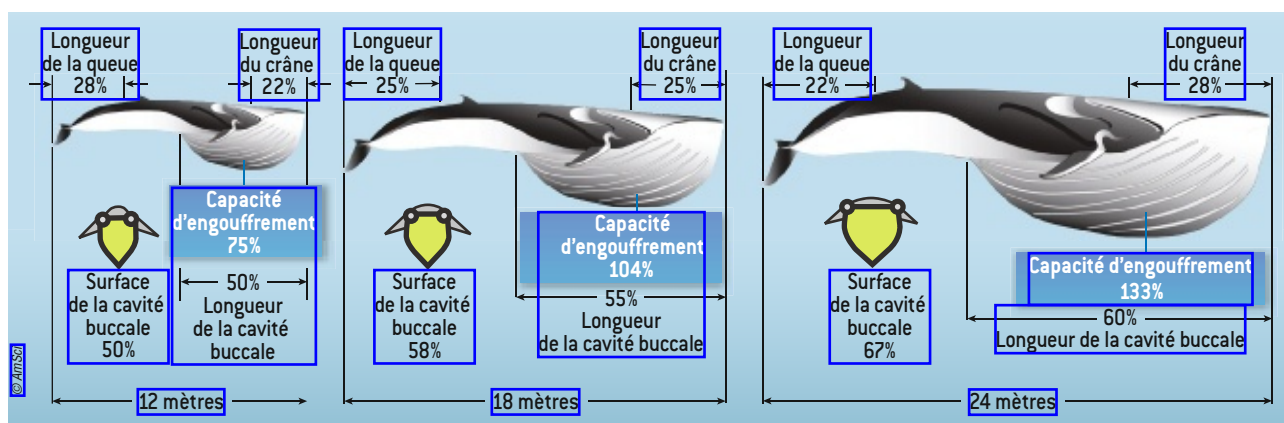
Que peut engouffrer une baleine ?

Dans les années 1920, le gouvernement britannique, cherchant à gérer l'industrie de la chasse à la baleine, a lancé une série d'expéditions, les *Discovery Investigations*, afin d'en apprendre plus sur l'histoire naturelle et la biologie des grandes baleines de l'océan Austral. Une étude particulière était consacrée aux proportions des deux plus grandes espèces de baleines, le rorqual commun et le rorqual bleu.

Ces espèces, parmi les plus grands animaux de tous les temps, présentent cependant une large gamme de tailles. Par exemple, la longueur au sevrage des rorquals communs et des baleines bleues est d'environ 12 et 16 mètres, respectivement, tandis que leur taille maximale est de 24 et 28 mètres. Lors des expéditions britanniques, des données morphométriques, dont certaines relatives à l'appareil d'engouffrement, ont été enregistrées sur des centaines de



7. LES SPÉCIMENS DE BALEINES du Muséum national d'histoire naturelle de l'Institution Smithsonian, aux États-Unis, comprennent, sur ce photomontage, les mandibules d'un rorqual bleu (de couleur grise) et d'un cachalot (de couleur jaune).



8. QUAND UN RORQUAL COMMUN GRANDIT, sa cavité buccale ne s'accroît pas de façon linéaire, mais son rapport à la taille du corps augmente. La longueur de la cavité buccale par rapport à celle du corps passe de 50 à 60 pour cent, celle du crâne de 22 à 28 pour cent, tan-

dis que la part de la queue diminue de 28 à 22 pour cent. La surface de la cavité buccale augmente de 50 à 67 pour cent de la surface totale projetée du corps, et la capacité d'engouffrement augmente de 75 à 133 pour cent de la masse du corps.

rorquals communs et de rorquals bleus représentant ces gammes de taille.

Résultat : les baleines les plus grandes ont des mâchoires et des cavités buccales surdimensionnées par rapport à leur taille, tandis que la région située entre l'aileron dorsal et la nageoire caudale devient relativement plus petite. Les auteurs de l'étude n'expliquaient pas cette morphologie, probablement parce que leurs données ont été recueillies avant que nous connaissions son importance sur les performances alimentaires.

Avec l'aide de mes collègues, j'ai repris les données britanniques concernant le rorqual commun, afin d'estimer sa capacité d'engouffrement en fonction de la taille. Comme nous l'avions prévu, la masse relative d'eau engloutie augmente avec la taille du rorqual, puisque l'appareil d'engouffrement devient plus grand.

Une question d'échelle

Question connexe : pourquoi la queue des baleines de grande taille est-elle relativement plus petite ? Peut-être parce que toutes les ressources liées à la croissance sont consacrées à la partie antérieure du corps, avons-nous suggéré. Lorsque les rorquals communs grandissent, leur capacité d'engouffrement augmente. Effectivement, le crâne devient relativement plus long et plus large par rapport au corps, et la surface d'ouverture de la cavité buccale est aussi plus grande en proportion chez les rorquals de grande taille (voir la figure 8). De plus, la longueur de la graisse ventrale à sillons augmente proportionnellement, ce qui accroît la capacité de la cavité

buccale. Étant donné que d'autres grandes baleines engouffreuses présentent aussi ce type de croissance relative, ces configurations morphologiques représentent vraisemblablement une adaptation liée à l'alimentation par engouffrement.

La taille de leur queue n'affecte pas la nage des grandes baleines, car la surface de propulsion qui engendre la poussée est généralement proportionnelle à la taille du corps. Cependant, l'accroissement de la capacité buccale a un coût. L'engouffrement étant actif, des masses d'eau plus importantes doivent être accélérées. Ainsi, les grandes baleines doivent dépenser plus d'énergie en proportion pour chaque phase de capture.

Si l'on considère que ces coûts énergétiques restreignent le temps de plongée, en comparaison d'autres animaux plongeurs, le temps de plongée des plus grandes baleines serait davantage limité que celui de leurs congénères plus petits. Une telle conséquence pourrait être préjudiciable, car les bancs de proies suffisamment denses tendent à se trouver en profondeur. En théorie, la dépense d'énergie pour se nourrir s'accroît plus rapidement avec la taille du corps que le gain d'énergie apporté par ce mode d'alimentation.

Extrapolons ce scénario à une « mégabaleine » hypothétique, une baleine beaucoup plus grande qu'un rorqual bleu. Un tel cétacé ne serait pas capable de soutenir son métabolisme en se nourrissant uniquement par engouffrement. Autrement dit, si l'évolution a sélectionné la taille de ces mammifères jusqu'à ses valeurs actuelles, il existe indiscutablement une limite supérieure que les baleines engouffreuses ne peuvent dépasser.

BIBLIOGRAPHIE

J.A. Goldbogen *et al.*, *Mechanics, hydrodynamics and energetics of blue whale lunge feeding : efficiency dependence on krill density*, *J. Exp. Biol.*, vol. 214, pp. 131-146, 2011.

J.A. Goldbogen *et al.*, *Skull and buccal cavity allometry increase mass-specific engulfment capacity in fin whales*, *Proc. Roy. Soc. B*, vol. 277, pp. 861-868, 2010.

J. Potvin *et al.*, *Passive versus active engulfment : verdict from trajectory simulations of lunge-feeding fin whales *Balaenoptera physalus**, *J. Roy. Soc. Interface*, vol. 6, pp. 1005-1025, 2009.

J.A. Goldbogen *et al.*, *Foraging behavior of humpback whales : Kinematic and respiratory patterns suggest a high cost for a lunge*, *J. Exp. Biol.*, vol. 211, pp. 3712-3719, 2008.

J. Calambokidis *et al.*, *Insights into the underwater diving, feeding and calling behavior of blue whales from a suction-cup attached video-imaging tag (CRITTERCAM)*, *Marine Technol. Soc. J.*, vol. 41, pp. 19-29, 2007.

L.S. Orton *et P.F. Brodie*, *Engulfing mechanics of fin whales*, *Can. J. Zool.*, vol. 65, pp. 2898-2907, 1987.

Astronomie

Étoiles : une naissance obscure

UNE RÉGION DE FORMATION STELLAIRE
intense près du noyau de la galaxie M83, observée par le télescope spatial *Hubble*. Les théories classiques ne rendent pas compte de façon satisfaisante de l'émergence des étoiles bleues massives, ni de la façon dont elles restituent de l'énergie aux nuages de gaz à partir desquels elles se forment.

Les étoiles naissent de l'effondrement d'un nuage de gaz et de poussière. Mais si les grandes lignes de ce scénario sont connues, plusieurs questions restent ouvertes.

Erick Young

S'il y a bien un scénario solidement établi en astronomie, c'est comment se forment les étoiles. L'idée générale a été proposée par Emmanuel Kant et Pierre-Simon Laplace, au XVIII^e siècle. La source de leur luminosité et leur évolution ont été élucidées par les physiciens de la première moitié du XX^e siècle. Aujourd'hui, les principes qui gouvernent la vie des étoiles sont enseignés au collège, et ce sont les objets exotiques tels que la matière noire ou l'énergie sombre qui attirent la curiosité du public. La formation des étoiles serait donc une question réglée. C'est pourtant loin d'être le cas. La naissance des étoiles reste un des sujets les plus brûlants de l'astronomie contemporaine.

Pour simplifier, le processus se résume à la victoire de la gravité sur la pression. Cela commence par un énorme nuage de gaz et de poussière flottant dans l'espace interstellaire. Si le nuage – ou plus exactement, une petite région dense, nommée cœur – est suffisamment froid et dense, sa propre gravité l'emporte sur la pression du gaz, et il commence à s'effondrer sous son propre poids. Le cœur devient de plus en plus dense et chaud, jusqu'à ce que la fusion nucléaire s'amorce en son sein. La chaleur dégagée par la fusion augmente la pression à l'intérieur de l'objet ; laquelle s'oppose à l'effondrement. La nouvelle étoile s'installe dans un équilibre dynamique qui peut durer des millions à des milliards d'années.

Ce scénario est cohérent et concorde avec un corpus d'observations toujours plus fourni. Mais il est loin d'être complet. Si l'on y regarde de plus près, chaque phrase du paragraphe précédent appelle une explication... qui se fait attendre. Quatre questions en particulier tracassent les astronomes. Tout d'abord, si les cœurs denses sont les « œufs » des étoiles, où sont les « poules » cosmiques ? Les nuages doivent eux-mêmes venir de quelque part, et leur formation est mal comprise. Deuxièmement, pourquoi le cœur dense commence-t-il à s'effondrer ? Le mécanisme

d'amorce détermine le taux de formation stellaire et la masse finale des étoiles.

Troisièmement, comment les embryons d'étoiles influent-ils les uns sur les autres ? La théorie standard décrit les étoiles indépendamment, mais pas ce qui se passe lorsqu'elles se forment en groupe, comme c'est le cas pour la plupart d'entre-elles. Des découvertes récentes suggèrent que le Soleil est né au sein d'un amas, dispersé depuis. En quoi grandir dans une pouponnière bondée est-il différent d'être enfant unique ?

Enfin, comment les étoiles massives parviennent-elles simplement à se former ? La théorie standard explique la formation des étoiles dont la masse n'excède pas 20 fois celle du Soleil, mais achoppe sur les plus massives, dont l'intense rayonnement devrait souffler le nuage avant que l'étoile naissante n'ait atteint sa masse définitive. De plus, le rayonnement ultraviolet, l'éjection de matière à grande vitesse et les ondes de choc supersoniques associés aux étoiles massives dévastent leur environnement et perturbent fortement le nuage ; ce que la théorie classique ne prend pas en compte.

Cachées dans la poussière

Répondre à ces questions se fait de plus en plus pressant. La formation stellaire sous-tend presque tous les autres domaines de l'astronomie, depuis l'avènement des galaxies jusqu'à la genèse des planètes. Tant qu'ils ne comprendront pas parfaitement la formation des étoiles, les astronomes ne peuvent pas espérer expliquer celle des galaxies lointaines ou l'existence des planètes dans d'autres systèmes stellaires.

Même si les détails nous échappent encore, une certitude se dégage : une théorie plus précise de la formation stellaire passe par la prise en compte de l'environnement de l'étoile en devenir. L'état final de la nouvelle étoile dépend non seulement des conditions initiales dans le nuage, mais aussi de l'influence ultérieure de son environnement et de ses voisins

L'ESSENTIEL

✓ Les étoiles se forment à partir de nuages de gaz qui s'effondrent ; mais d'où viennent ces nuages, et pour quelle raison s'effondrent-ils ?

✓ En outre, la théorie envisage des étoiles isolées et néglige leurs interactions et leur rétroaction sur le nuage qui leur a donné naissance.

✓ Les astronomes ont observé comment des étoiles massives peuvent déclencher l'effondrement de nuages, et comment les nouvelles étoiles interagissent.

NASA, ESA, the Hubble Heritage Team

UNE ÉTOILE EST NÉE... NON SANS MAL

La théorie classique de la formation stellaire explique parfaitement la naissance des étoiles isolées de masse faible à moyenne, mais les lacunes conceptuelles y sont encore nombreuses.

1. Le point de départ de la formation stellaire est un nuage moléculaire géant, c'est-à-dire une masse froide de gaz et de poussière.

2. Au sein du nuage, une région particulièrement dense (un cœur) s'effondre sous son propre poids.

3. Le cœur se fragmente en de multiples embryons stellaires. Dans chacun d'eux, une protoétoile forme un noyau et attire du gaz et de la poussière.

Nuage

Cœur

Protoétoile

PROBLÈME N° 1 : D'où vient le nuage ? Un mélange de matériaux produits lors du Big Bang ou éjectés par les étoiles doit se condenser d'une façon ou d'une autre.

PROBLÈME N° 2 : Pourquoi le cœur s'effondre-t-il ? Le modèle ne dit pas comment l'équilibre des forces qui maintiennent le nuage dans un état stable est perturbé.

PROBLÈME N° 3 : Comment les embryons interagissent-ils ? La théorie classique traite les étoiles isolées, une par une.

L'AUTEUR



Erick YOUNG, astronome à l'Université d'Arizona jusqu'en 2009, dirige la mission SOFIA (*Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy*).

stellaires. C'est l'éternel débat de l'inné et de l'acquis, à l'échelle cosmique...

Si vous regardez le ciel par une nuit bien noire, vous pourrez voir la traînée de lumière diffuse de la Voie lactée sur la voûte céleste. Elle est interrompue par des zones sombres : des nuages interstellaires, dont les particules de poussière interceptent la lumière des étoiles et les rendent opaques à la lumière visible.

C'est dans ces nuages de poussière et de gaz que naissent les étoiles. Par conséquence, ce phénomène est caché et donc très difficile à observer. On peut voir où le processus démarre – dans les nuages opaques – et comment il prend fin – par l'apparition d'une étoile –, mais ce qui se passe entre les deux reste obscur. Le peu de rayonnement qui filtre se situe dans le domaine de l'infrarouge lointain et des ondes submillimétriques, où les capacités d'observation sont assez rudimentaires par rapport à d'autres plages du spectre électromagnétique.

La formation des nuages de poussière et de gaz est une étape du cycle du milieu interstellaire : les nuages engendrent des étoiles, qui recyclent les éléments en leur sein, avant de les relâcher dans le milieu interstellaire à leur mort, et ainsi de suite. Le milieu interstellaire est constitué aux

trois quart d'hydrogène et d'un quart d'hélium ; tous les autres éléments représentent à peine quelques pour cent. Une partie de ce matériau est de la matière primordiale à peine altérée depuis le Big Bang, une part est rejetée par les étoiles au cours de leur vie, et une autre est formée de débris d'explosions stellaires.

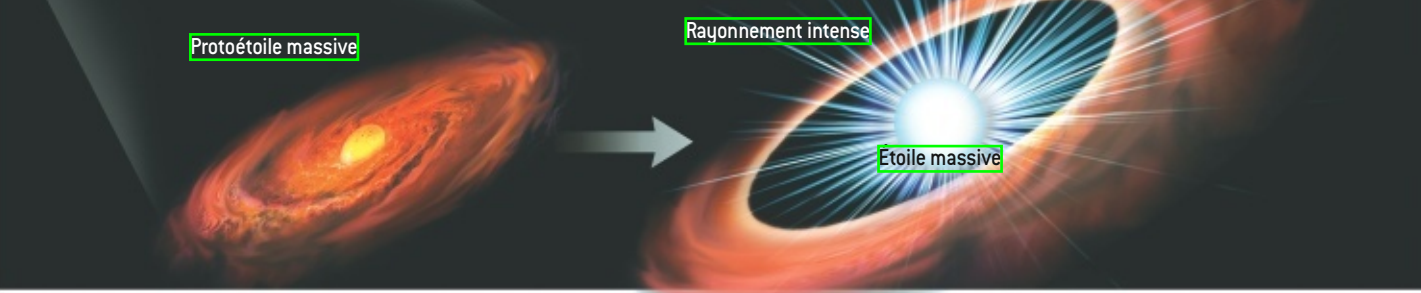
Au départ, le gaz se trouve sous forme d'atomes, car le rayonnement énergétique des étoiles casse les molécules. Il est diffus, avec environ un atome d'hydrogène par centimètre cube. En se refroidissant, le gaz se condense néanmoins en nuages, comme la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Ce faisant, il libère de l'énergie. Le milieu étant très peu dense, cette énergie ne peut être évacuée par collisions. Le moyen le plus efficace est l'excitation et la réémission dans l'infrarouge lointain de certains éléments, tel le carbone ionisé qui émet à la longueur d'onde de 158 micromètres. La basse atmosphère terrestre est opaque à ces longueurs d'onde, si bien qu'elles doivent être étudiées depuis l'espace (par exemple par l'observatoire spatial *Herschel*, lancé en 2009 par l'Agence spatiale européenne) ou la haute atmosphère, par des télescopes embarqués sur des avions (mission SOFIA).

À mesure que les nuages se refroidissent, ils deviennent plus denses. Quand ils

4. La protoétoile voit sa taille diminuer et sa densité augmenter. Elle devient une étoile quand la fusion nucléaire s'amorce en son centre. Des planètes émergent du matériau restant qui gravite autour d'elle.



PROBLÈME N°4 : Comment des étoiles massives peuvent-elles se former ? En atteignant une vingtaine de masses solaires, les étoiles deviennent tellement lumineuses qu'elles chassent le gaz environnant, bloquant leur propre croissance, ainsi que celle des étoiles voisines.



atteignent environ 1 000 atomes par centimètre cube, ils sont assez épais pour bloquer le rayonnement ultraviolet énergétique des étoiles environnantes. Les atomes d'hydrogène peuvent alors se recombiner et former des molécules, par un processus complexe faisant intervenir la catalyse des grains de poussière présents dans le nuage. Les observations en ondes radio ont montré que ces nuages dits moléculaires contiennent des composés allant de l'hydrogène moléculaire aux molécules organiques complexes, qui auraient pu jouer un rôle dans l'apparition de la vie sur Terre.

Le chaînon manquant

Mais au-delà de ces étapes, la piste s'efface. Les observations infrarouges ont débusqué des étoiles naissantes profondément enchaînées dans la poussière, mais n'ont pu révé-

ler l'étape précédente, le passage des nuages moléculaires à ces protoétoiles.

Au milieu des années 1990, le satellite MSX et l'observatoire spatial infrarouge ISO ont découvert des nuages si denses (plus de 10 000 atomes par centimètre cube) qu'ils sont opaques même à l'infrarouge thermique qui pénètre d'habitude la poussière. Ces «nuages sombres dans l'infrarouge» sont beaucoup plus massifs (100 à 100 000 fois la masse du Soleil) que les nuages moléculaires standards. Ces dernières années, ces nuages ont été recensés dans deux relevés en infrarouge du plan de la Galaxie réalisés avec le télescope spatial Spitzer (relevés GLIMPSE et MIPS GAL, voir l'encadré page 52, en haut). Ils pourraient être le chaînon manquant entre les nuages moléculaires et les protoétoiles.

En fait, les nuages sombres et les cœurs denses représentent peut-être l'étape

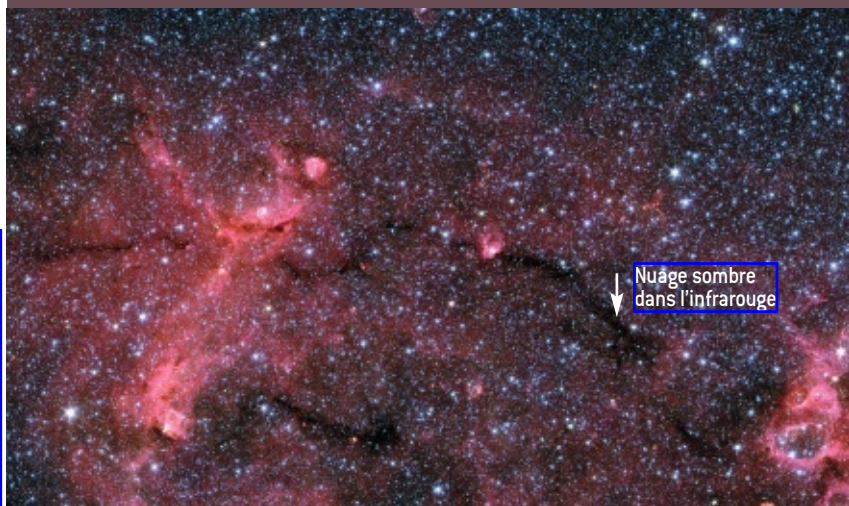
cruciale de formation des étoiles : la masse de l'étoile serait déjà déterminée à ce stade par celle du nuage. Il existe des nuages de toutes masses ; les petits étant plus courants que les grands. Cette distribution de masse ressemble beaucoup à celle des étoiles, si ce n'est que les nuages sont trois fois plus massifs, ce qui suggère que seul un tiers de la masse d'un nuage se retrouve dans la nouvelle étoile. Le reste se perd dans l'espace d'une façon ou d'une autre.

Les mesures de la masse des nuages moléculaires ne sont cependant pas encore assez fiables pour que l'on puisse dire si ce parallèle entre la distribution de masse des étoiles et celle des nuages moléculaires est une vraie relation de cause à effet, ou une simple coïncidence. Mais, quel que soit le mécanisme qui fixe la masse d'une étoile, il détermine toute son histoire : étoile massive qui mourra jeune et explosera dans un

L'ORIGINE DES NUAGES INTERSTELLAIRES

Les astronomes ont identifié les étapes par lesquelles les nuages se condensent à partir du gaz interstellaire et deviennent progressivement plus denses. L'étape précédant la formation d'une protoétoile est représentée par les « nuages sombres dans l'infrarouge ». Opaques même à la lumière infrarouge, ils apparaissent sous forme de bandes noires sur cette image du relevé GLIMPSE, réalisée par le télescope spatial infrarouge *Spitzer*. Leur taille et leur masse correspondent à ce qui est nécessaire pour former des étoiles.

VIA GLIMPSE FROM UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON



Nuage sombre dans l'infrarouge

UN EFFONDREMENT PROVOQUÉ

Les manuels d'astronomie restent vagues sur les mécanismes de destabilisation et d'effondrement des nuages moléculaires. Des images infrarouges de *Spitzer* révèlent que des étoiles massives proches en sont souvent responsables.

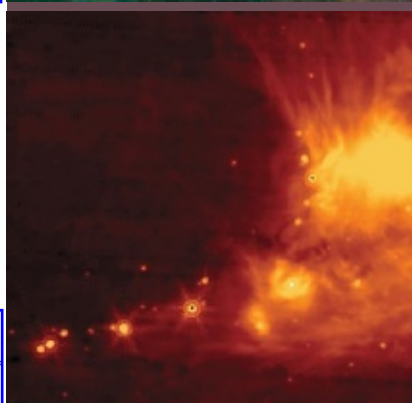
NASA, W. P. MARSH ET HARVARD-SMITHSONIAN CENTER FOR ASTRONOMY



Ci-dessus. Dans la région W5, des étoiles massives (en bleu) ont « nettoyé » une cavité dans le nuage moléculaire. Sur le bord se trouvent des protoétoiles (dans le gaz blanc-rose) qui ont toutes le même âge. Cette synchronicité résulterait de l'influence des étoiles massives.

À gauche. Dans l'amas NGC 2068, des protoétoiles sont alignées comme des perles sur un collier. Bien qu'éparses, elles se sont formées presque simultanément. Le responsable est sans doute aussi un groupe d'étoiles massives voisines.

NASA



cataclysme, ou étoile plus modeste qui vivra plus longtemps et disparaîtra en douceur.

Les astronomes font aussi des progrès sur la cause de l'effondrement d'un nuage ou d'un cœur dense. Dans le modèle classique, un cœur se trouve au départ en équilibre; la gravité et la pression extérieure exactement équilibrées par la pression interne thermique et magnétique, ou la turbulence. L'effondrement commence quand cet équilibre est perturbé au profit de la gravité. Mais quelle est la cause de ce déséquilibre? Les astronomes ont proposé de nombreux mécanismes. Une force extérieure telle que l'onde de choc d'une explosion de supernova pourrait comprimer le nuage. La pression interne pourrait aussi diminuer à mesure que la chaleur ou les champs magnétiques se dissipent.

Spontané ou provoqué ?

Charles Lada, du Centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique, et ses collègues privilégient la lente dissipation de la pression thermique. En cartographiant les nuages moléculaires aux longueurs d'onde millimétriques et submillimétriques, à cheval sur les bandes radio et infrarouge, ils sont parvenus à identifier un grand nombre de cœurs isolés relativement calmes dans des nuages proches. Certains présentent des signes de mouvements lents vers l'intérieur et pourraient s'apprêter à produire des étoiles. Un bon exemple en est Barnard 355, situé dans la constellation de l'Aigle. Son profil de densité correspond exactement à ce que l'on attendrait si la pression thermique du nuage était pratiquement à l'équilibre avec la pression extérieure. Une source infrarouge repérée au centre serait une protoétoile à un stade très précoce, suggérant que l'équilibre s'est récemment rompu dans le sens d'un effondrement.

D'autres études appuient l'hypothèse d'une cause extérieure. Thomas Preibisch, de l'Institut Max Planck de radioastronomie de Bonn, et ses collègues ont montré que des étoiles éparses de la région supérieure de la constellation du Scorpion se sont presque toutes formées en même temps. Cela serait une coïncidence extraordinaire que la pression interne des différents cœurs diminue au même moment. Une explication plus vraisemblable est qu'une onde de choc provoquée par une supernova aurait balayé la région et entraîné

l'effondrement des cœurs. Mais les preuves sont ambiguës, parce que les étoiles massives perturbent leur environnement natal, si bien qu'il est difficile de reconstruire les conditions dans lesquelles elles se sont formées. Une autre limite est la difficulté de confirmer que les étoiles de plus faible masse de la région, qui sont moins brillantes, se sont formées en même temps.

Le télescope *Spitzer* a permis de progresser sur cette question. Lori Allen, de l'Observatoire national pour l'astronomie optique (NOAO), et ses collègues ont découvert un exemple frappant de cause externe d'effondrement dans une région nommée W5 (voir l'encadré page 52 en bas). Les images montrent de jeunes protoétoiles enchâssées dans des poches de gaz denses qui ont été comprimées par le rayonnement d'une génération précédente d'étoiles. La compression étant environ dix fois plus rapide que l'effondrement spontané, ces objets disséminés doivent s'être formés presque simultanément. Pour résumer, le déclenchement de la formation stellaire n'est pas une situation binaire, comme on le pensait auparavant. Il existe tout un spectre de processus.

Naissances en groupe

En dehors du cas des effondrements provoqués, le modèle classique explique assez bien les observations de cœurs isolés formant des étoiles. Mais beaucoup d'étoiles, peut-être la plupart, se forment dans des amas, et le modèle ne rend pas compte de la façon dont cet environnement encombré perturbe leur naissance. Ces dernières années, les chercheurs ont développé deux théories concurrentes, qui ont pu être précisées grâce aux progrès considérables réalisés en termes de puissance de calcul. Les observations en infrarouge aident les astronomes à trancher.

La première théorie, dite concurrentielle, portée par Ian Bonnell, de l'Université de St Andrews en Écosse, et d'autres, est la plus étonnante. Les interactions entre cœurs adjacents au sein du nuage sont importantes. Il se forme de nombreuses protoétoiles très petites, qui se déplacent ensuite rapidement dans le nuage et entrent en compétition pour accréter le gaz restant. Certaines deviennent beaucoup plus grosses que d'autres, et les perdantes sont purement et simplement éjectées de l'amas, créant une classe « d'avortons stellaires » qui errent dans la Galaxie.

L'autre classe de modèles, dits du cœur turbulent, développés notamment par Christopher McKee, de l'Université de Californie à Berkeley, est directement dérivée du modèle classique, mais avec un rôle accru de la turbulence. Plusieurs cœurs s'effondrent dans le nuage, mais, à cause de la turbulence, ils sont de tailles différentes dès le départ. La distribution de masse des étoiles résultantes reflète le spectre de la turbulence initiale, et non une compétition ultérieure pour le matériau.

Les observations semblent pencher en faveur du modèle du cœur turbulent, mais le modèle concurrentiel pourrait être valable dans des régions de densité stellaire très élevée. Un cas intéressant est celui de l'amas du Sapin de Noël (NGC 2264) dans la constellation de la Licorne (voir ci-dessous). En lumière visible, cette région présente un grand nombre d'étoiles brillantes et une abondance de poussière et de gaz, caractéristiques de la formation stellaire. Les observations de *Spitzer* y ont révélé la présence d'un amas dense avec des étoiles à divers stades de développement. Cet amas permet de visualiser avec précision les étapes où la turbulence ou l'accrétion concurrentielle laisseraient leur marque.

Les étoiles les plus jeunes, et donc les plus froides, qui rayonnent plus aux grandes longueurs d'onde, sont rassemblées en

A voir dans l'infrarouge

✓ Les nuages moléculaires sont des taches noires en lumière visible, mais ils s'éclairent dans l'infrarouge. Ces longueurs d'onde traversent en effet mieux la poussière. Les protoétoiles et les nuages rayonnent la majeure partie de leur énergie dans ce domaine.

✓ Le rayonnement infrarouge correspond à des longueurs d'onde de 1 à 1 000 micromètres. La matière dont la température est comprise entre 3 et 3 000 kelvins rayonne en infrarouge.

✓ Le proche infrarouge, entre un et cinq micromètres, correspond à de la lumière stellaire un peu atténuée par la poussière. La plupart des observations infrarouges sont concentrées dans ce domaine.

✓ L'infrarouge moyen et lointain, jusqu'à 200 micromètres, est surtout émis par la poussière. Ces longueurs d'onde sont bloquées par l'atmosphère terrestre.

✓ Le rayonnement submillimétrique, de 350 à 1 000 micromètres, caractérise le matériau droid.

DES CRÈCHES D'ÉTOILES SURCHARGÉES

Bien que le modèle classique de formation stellaire n'en tienne pas compte, les étoiles naissantes peuvent interférer avec la formation de leurs voisines. Le télescope *Spitzer* a trouvé dans l'amas du Sapin de Noël (NGC 2264) un amas dense d'étoiles d'âges variés. Certaines des « étoiles » les plus jeunes s'avèrent être des groupements serrés de protoétoiles, parfois jusqu'à une dizaine dans un rayon de 0,1 année-lumière, et donc assez proches pour interagir.



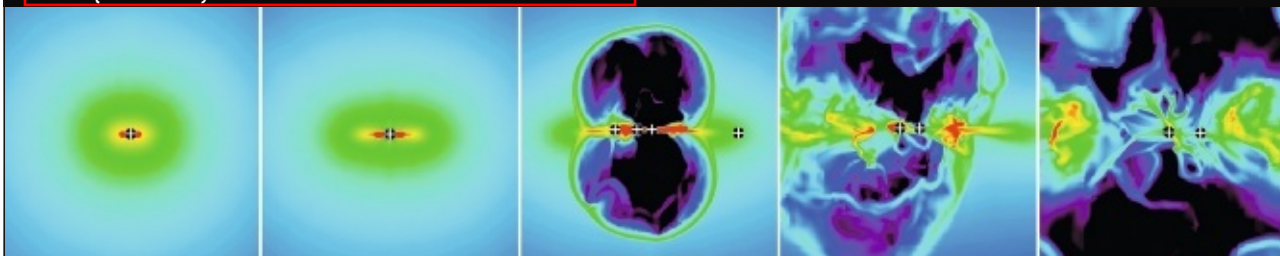
NASA, JPL-Caltech et l'European Southern Observatory (ESO)

DÉPASSER LA MASSE LIMITE

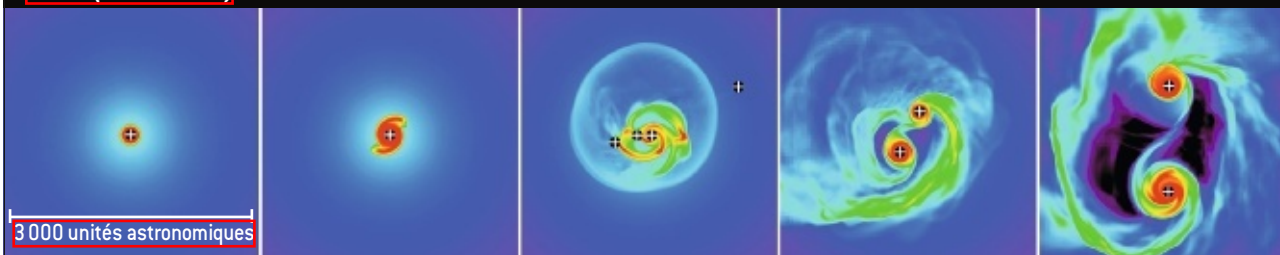
Des simulations numériques récentes montrent qu'une étoile peut atteindre une masse élevée. Comment ? Grâce à une croissance non uniforme. Le rayonnement émis par la pro-

toétoile repousse le gaz, créant des vides géants au sein du gaz. Toutefois, il ne tarit pas complètement le flux entrant, qui se rassemble sous forme de filaments entre ces vides.

Densité (vue de côté)



Densité (vue de dessus)



3 000 unités astronomiques

17 500 ANS : Une protoétoile s'est formée, et du gaz tombe dessus de façon quasi uniforme. L'énergie potentielle gravitationnelle libérée fait briller faiblement la protoétoile.

25 000 ANS : Quand la protoétoile a atteint environ 11 masses solaires, le disque qui l'entoure devient gravitationnellement instable et forme une spirale.

34 000 ANS : au-delà de 17 masses solaires, le rayonnement de la protoétoile chasse le gaz, créant une bulle. Du gaz continue à tomber par les côtés. D'autres protoétoiles se forment.

41 700 ANS : Une petite protoétoile croît plus vite que la protoétoile centrale et rivalise bientôt de taille avec elle. L'accrétion est inégale dans l'espace, mais aussi irrégulière dans le temps.

55 900 ANS : A la fin de la simulation, l'étoile centrale atteint 42 masses solaires et son compagnon, 29. Il reste quelque 28 masses solaires de gaz, qui finiront sans doute par être absorbées.

M. Krumholz et al., Science, vol. 324, 15 janvier 2005

À quelle vitesse se forment les étoiles ?

✓ C'est une question qui donne du fil à retordre aux astronomes. Le point crucial est l'étape finale de l'effondrement, après la formation du noyau de la protoétoile, mais avant qu'elle ait grossi en accrétant de la masse. L'équipe de Neal Evans, de l'Université du Texas à Austin, a observé des complexes de formation stellaire proches avec le télescope spatial *Spitzer* et trouvé que l'accrétion se fait à un rythme très irrégulier. L'étoile grossit très rapidement jusqu'à la moitié de sa masse finale, mais sa croissance ralentit ensuite ; il lui faut dix fois plus de temps pour accumuler le reste de sa masse. L'ensemble du processus est donc plus long que ce que l'on estimait auparavant : deux millions d'années en moyenne pour une étoile de type solaire.

un groupe serré. Paula Teixeira, de l'Observatoire européen austral, et ses collègues ont montré qu'elles sont espacées d'environ 0,3 année-lumière. Ce motif régulier est ce que l'on attendrait si les cœurs denses s'effondrent sur place, à partir des conditions initiales dans le nuage moléculaire global, comme ce que décrit le modèle turbulent. Dans le modèle concurrentiel, *a contrario*, la répartition des étoiles devrait être aléatoire. Pourtant, les images plus détaillées montrent que certaines protoétoiles apparentes ne sont pas des objets uniques, mais des groupes compacts d'objets. L'un d'entre eux regroupe dix sources dans un rayon de 0,1 année-lumière. C'est une densité telle que l'accrétion concurrentielle doit entrer en jeu, au moins à petite échelle.

Par conséquent, comme pour l'effondrement, l'effet de l'environnement sur la taille des étoiles n'est pas exclusif. La turbulence et l'accrétion concurrentielle peuvent toutes deux opérer.

Les étoiles massives sont rares et ne vivent pas longtemps, mais elles jouent un rôle très important dans l'évolution des

galaxies. Elles injectent de l'énergie dans le milieu interstellaire à la fois par leur rayonnement et par le flot de matière qu'elles éjectent, et, à la fin de leur vie, elles explosent en supernovae, restituant de la matière enrichie en éléments lourds. La Voie lactée est criblée de bulles et de vestiges de supernovae créés par ces étoiles.

Prendre du poids : pas si simple

Cependant, la théorie classique peine à expliquer leur formation. À partir du moment où une protoétoile atteint le seuil d'environ 20 masses solaires, la pression exercée par son rayonnement devrait l'emporter sur la gravité et l'empêcher de poursuivre sa croissance. En plus de la pression du rayonnement, le vent stellaire d'une étoile massive disperse son nuage natal, limitant davantage sa croissance, tout en interférant avec la formation d'étoiles dans les environs.

Des travaux théoriques récents de Mark Krumholz et ses collègues offrent une piste pour sortir de cette impasse. Leurs simu-

lations en trois dimensions montrent la croissance stellaire dans toute sa complexité. L'afflux de matériau n'y est pas uniforme ; les régions denses alternent avec des bulles où la lumière stellaire peut s'échapper. Ainsi, la pression radiative pourrait finalement ne pas faire obstacle à la croissance. Des étoiles compagnons se forment aussi facilement à partir du matériau dense en accretion, expliquant pourquoi les étoiles massives sont rarement solitaires. Les astronomes cherchent maintenant la confirmation de ces simulations en observant avec le télescope *Spitzer* des régions de formation d'étoiles massives. La vérification sera cependant délicate : la rareté et la brièveté de ces étoiles rendent leur formation difficile à observer.

Heureusement, de nouveaux équipements vont permettre de progresser sur les questions liées à la formation des étoiles. *Herschel* et *SOFIA* observent depuis peu les longueurs d'onde submillimétriques et de l'infrarouge lointain, domaines où la formation stellaire est la plus facile à voir. Ils ont la résolution spatiale et spectrale nécessaire pour car-

tographier la répartition des vitesses dans les nuages interstellaires. Aux plus grandes longueurs d'onde, l'interféromètre ALMA, en construction dans les Andes chiliennes, permettra de cartographier les protoétoiles avec un luxe de détails.

Avec ces nouvelles observations, les astronomes espèrent déterminer le cycle de vie complet du milieu interstellaire, des nuages atomiques aux nuages moléculaires, jusqu'aux cœurs prestellaires et aux étoiles, et enfin le retour au gaz diffus. Ils espèrent également observer les disques protostellaires avec une résolution angulaire suffisante pour suivre la chute de matériau issu du nuage, ainsi que comparer les effets de différents environnements sur la naissance des étoiles.

Les réponses auront des répercussions dans d'autres domaines de l'astrophysique. La théorie actuelle de la formation stellaire n'est pas mauvaise, mais ses lacunes nous empêchent d'expliquer certains des aspects les plus importants de l'Univers. La formation stellaire est un processus plus riche que ce que nous avions anticipé. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Krumholz *et al.*, **The formation of massive star systems by accretion**, *Science*, vol. 323, pp. 754-757, 2009.
arxiv.org/abs/0901.3157

S. P. Zwart, **Les frères perdus du Soleil**, *Pour la Science* n° 387, janvier 2009.
<http://bit.ly/pls387-soleil>

M. Heydari-Malayeri, **L'énigmatique formation des étoiles massives**, *Pour la Science* n° 359, septembre 2007.
<http://bit.ly/pls359-etoiles-massives>

S. Mohanty et R. Jayawardhana, **La naissance tragique des naines brunes**, *Pour la Science* n° 340, février 2006. <http://bit.ly/pls340-naines-brunes>

E. Young *et al.*, ***Spitzer* and Magellan observations of NGC 2264 : a remarkable star-forming core near IRS-2**, *Astrophysical Journal*, vol. 642, n° 2, pp. 972-978, 2006.
[Arxiv.org/abs/astro-ph/0601300](http://arxiv.org/abs/astro-ph/0601300)



LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

AU JARDIN DES PLANTES

2011, Année internationale des Forêts.
Dans le cadre de cet événement, le Muséum vous propose des cycles de conférences et de films.

ENTRÉE LIBRE

DÉTAILS SUR WWW.MNHN.FR, DANS "ÉVÉNEMENTS"

LES LUNDIS DU MUSÉUM, 18H

Cycle de conférences « La forêt : son rôle, son état, ses habitants » :

Lundi 7 mars : Forêt, climat et cycle du carbone, Denis Loustau, INRA

Lundi 14 mars : La dynamique et l'architecture des arbres en forêt guyanaise, Bernard Riéra, CNRS - **Lundi 28 mars** : Quelle(s) forêt(s) en France en 2100?, Vincent Badeau, INRA - **Lundi 4 avril** : Des forêts et des hommes sous les tropiques : une vieille cohabitation, Serge Bahuchet, Muséum.

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5^e
Métros : Gare d'Austerlitz - Jussieu

LES COURS PUBLICS, LES JEUDIS À 18H

Assurés par les chercheurs du Muséum, ils s'adressent à tous.

Cycle « Anatomie comparée » P.-H. Gouyon, Muséum.

Jeudi 24 mars : Formes et diversité - **Jeudi 31 mars** : Sélection et optimalité - **Jeudi 7 avril** : La forme et l'information

Grand Amphithéâtre du Muséum
57 rue Cuvier, Paris 5^e - Métro : Jussieu

LE BAR DES SCIENCES

Mercredi 16 mars à 19h30 : De la destruction des forêts à la reforestation

Café/Restaurant de la Baleine
47 rue Cuvier, Paris 5^e - Métro : Jussieu



Les attaques de circuits intégrés

John Villasenor

Des microcomposants peuvent être introduits à des fins malveillantes dans les circuits intégrés avant leur sortie d'usine. Tout dispositif électronique est une cible potentielle.

Votre téléphone portable ne répond plus ; le clavier est inactif et vous n'arrivez plus à envoyer ni à recevoir d'appels ou de messages textuels. Après avoir sans succès tenté d'éteindre l'appareil, vous retirez la batterie, la réinsérez, mais le téléphone demeure inerte. Manifestement, la panne est inhabituelle. Quelques heures plus tard, vous apprenez que votre cas est loin d'être isolé : le mobile de millions de personnes s'est figé de façon aussi soudaine qu'inexplicable.

Voilà comment pourrait se manifester une attaque matérielle à grande échelle. Cette menace augmente à mesure que les circuits intégrés qui contrôlent de nombreux équipements de la vie courante se perfectionnent. Chaque circuit, ou puce électronique, est devenu si complexe qu'aucune équipe d'ingénieurs ne connaît tous ses composants ; au contraire, ses différentes parties sont conçues un peu partout dans le monde, puis réunies pour la première fois lorsque la puce est gravée dans

L'ESSENTIEL

✓ De plus en plus complexes et puissants, les circuits intégrés, ou puces électroniques, sont aussi plus vulnérables aux attaques dites matérielles.

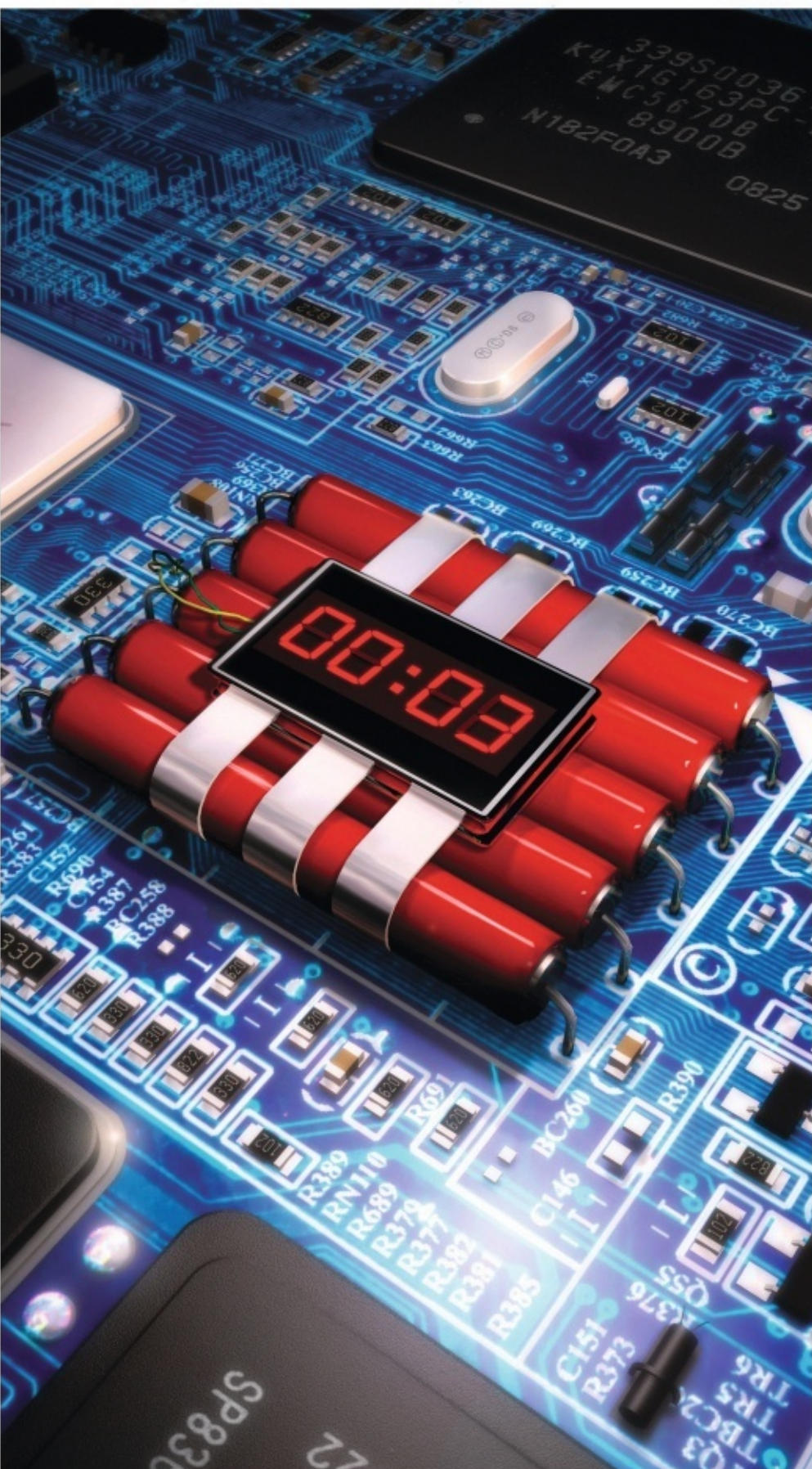
✓ Un « cheval de Troie » matériel peut bloquer le fonctionnement d'une puce des années après sa fabrication.

✓ Toutefois, la protection des équipements contre ces attaques matérielles ne relève pas de l'utopie.

du silicium. Le produit final est si complexe que les tests fonctionnels qu'il subit ne peuvent tout vérifier. Aussi, une pièce qui serait insérée dans la puce avec une intention malveillante restera indétectée... jusqu'au moment où elle sera activée par un événement déclencheur. Tel un cheval de Troie, elle ne passera à l'attaque qu'après avoir pénétré dans sa cible.

La nature des attaques matérielles les rend potentiellement bien plus pernicieuses que les vers, virus et autres logiciels malveillants. Même si un virus informatique peut se déplacer de machine en machine, il est en principe possible, à l'aide d'un antivirus, de l'éradiquer du système qu'il a infecté. En revanche, le seul moyen de remédier à une attaque matérielle consiste à changer les circuits infectés. Du moins pour l'instant.

La question tracasse tous les experts de la cybersécurité. En effet, tout ce qui contient un microprocesseur – c'est-à-dire tout ce qui est électronique – est vulnérable. Les circuits intégrés sont au cœur de nos systèmes de communication et de distribution d'électricité. Ils positionnent les volets des ailes des avions de ligne et modulent la puissance du système antiblocage des freins des voitures. Ils contrôlent l'accès aux coffres des banques, aux distributeurs de billets, le fonctionne-



ment des marchés financiers, et presque tous les systèmes sensibles utilisés par les forces armées. Ainsi, une attaque matérielle bien conçue pourrait interrompre les transactions commerciales ou immobiliser divers secteurs stratégiques.

Les chevaux de Troie matériels peuvent rester indétectables pendant des années. Ils ne s'activent que lorsqu'ils sont déclenchés par un événement, telles une date et une heure particulières. À cause de cette faille, il est possible que de tels composants aient déjà été dissimulés dans des équipements électroniques. Aucune attaque matérielle de grande ampleur n'a été confirmée officiellement jusqu'à présent, mais la lutte contre les virus logiciels nous l'a appris : il suffit d'un petit nombre de gens mal intentionnés dotés de connaissances techniques pour faire des dégâts.

Dès maintenant, il faut se poser les questions suivantes : quelles formes ces attaques pourront-elles prendre ? Qu'en résulterait-il ? Et, plus important encore : que peut-on faire pour les détecter et les arrêter, ou du moins minimiser leurs conséquences ?

Des blocs intrusifs

Un circuit intégré, ou puce électronique, est un ensemble d'éléments électroniques miniaturisés et interconnectés (transistors, diodes, etc.), gravé sur un socle de matériau semi-conducteur, le plus souvent du silicium. Les circuits intégrés modernes sont assez petits – quelques centimètres carrés –, mais peuvent contenir plusieurs milliards de transistors. C'est la taille et la complexité des puces modernes qui rendent possibles ces attaques.

Les puces sont divisées en sous-unités, les blocs, qui effectuent des tâches différentes. Par exemple, dans un téléphone portable, un premier bloc sert à stocker les images d'une vidéo ; un deuxième compresse cette vidéo en un fichier MPEG, et un troisième convertit le fichier dans un format qui peut être transmis par une antenne. Les données se déplacent de bloc en bloc à travers le bus système, qui agit comme une autoroute connectant les différentes parties de la puce.

Quand une entreprise se lance dans la conception d'un nouveau circuit intégré, elle détermine d'abord les blocs fonctionnels dont elle va avoir besoin. Elle conçoit certains de ces blocs sur place,

Ken Brown/Monolithic Systems

soit *de novo*, soit en modifiant un modèle de bloc utilisé pour une de ses précédentes puces. D'autres blocs sont achetés auprès d'entreprises tierces spécialisées dans les circuits accomplissant tel ou tel type de fonctionnalités – recevoir des données à partir d'une antenne, par exemple.

Ces blocs provenant de tiers ne sont pas fournis sous la forme d'un circuit sur silicium, car la conception des puces demande de graver tous les blocs fonctionnels sur la même surface. Au lieu de cela, ils arrivent sous forme d'un fichier de données qui décrit complètement comment le bloc devra être gravé dans le silicium. Ce fichier peut faire des milliers de lignes, ce qui rend sa lecture et la compréhension de toutes les parties de son fonctionnement quasi impossibles pour un être humain. Le concepteur du bloc fournit généralement aussi un logiciel permettant à l'acheteur de modéliser son comportement dans différentes situations. Avant que les circuits soient imprimés, l'entreprise simule comment les modèles des différents blocs de la puce fonctionnent ensemble pour s'assurer que cette dernière jouera le rôle espéré. Après une batterie de tests, l'entreprise commencera alors la fabrication physique, longue et coûteuse, du circuit intégré.

Un problème de confiance

C'est ici que se trouve le talon d'Achille : puisqu'un éventuel intrus s'active sous l'effet d'un événement déclencheur, les fabricants de puces devraient en théorie tester leurs modèles de blocs contre toutes les activations imaginables. C'est une mission impossible, tant le nombre de déclencheurs potentiels est grand. Outre son activation interne par une date et une heure, un matériel dissimulé peut être déclenché par exemple par la réception d'un message ou d'un courriel contenant une séquence spécifique de caractères. Les entreprises auront beau tester leurs puces, cela n'éliminera qu'une petite fraction des déclencheurs possibles.

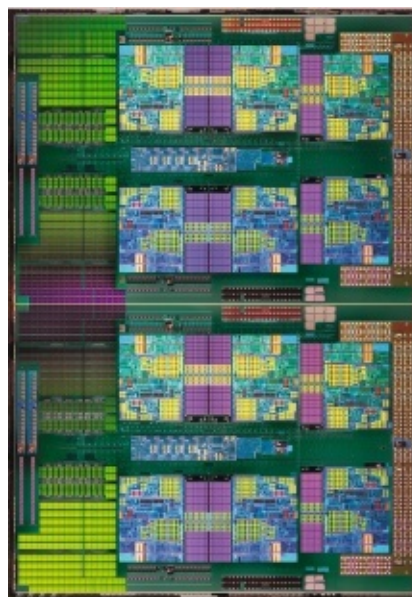
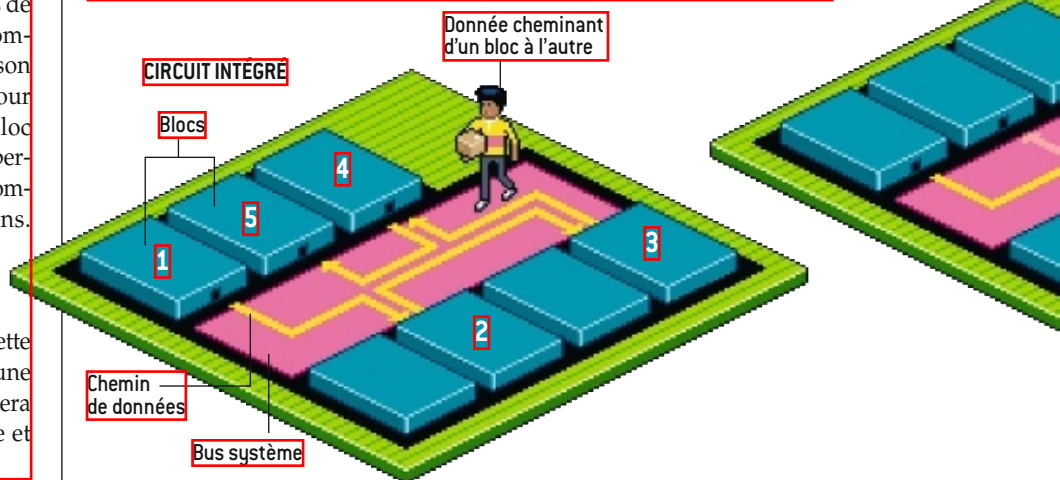
À l'époque des débuts des circuits intégrés, personne ne se souciait des pirates. Les premières puces étaient entièrement conçues sur le même site par de petites équipes travaillant ensemble. Cette organisation garantissant la sécurité, on savait que chaque composant de la puce ferait ce que l'on en attendait, et les

LE PROBLÈME GLOBAL DE SÉCURITÉ

Une puce comporte des circuits conçus sur plusieurs continents, par des centaines de personnes travaillant pour diverses entreprises. Grâce à cette globalisation, il est plus rapide et moins cher de développer de nouveaux produits. Mais cela multiplie également les risques, parce qu'il est presque impossible de détecter un intrus matériel caché parmi les centaines de millions de transistors de la puce durant sa fabrication.

À l'intérieur d'un circuit intégré

Une puce moderne contient un ensemble de blocs fonctionnels, dédiés chacun à une tâche (ou un ensemble de tâches) particulière. Les données se déplacent de bloc en bloc en passant par le bus système, et la circulation dans le bus est contrôlée par un autre bloc, l'arbitre de bus. Dans une puce de téléphone mobile, par exemple, les données passent d'un bloc mémoire (1) à un bloc qui effectue des calculs (2), puis à un autre qui code et décode de l'information (3) et à des blocs (4 et 5) qui échangent des données avec des sites extérieurs.



LE PROCESSEUR OPTERON 6100 D'AMD, ici sur une vue légèrement agrandie, réunit deux circuits intégrés qui contiennent au total plus de 1,8 milliard de transistors. Les couleurs correspondent aux différents blocs fonctionnels.

concepteurs ont pu établir des protocoles « ouverts », c'est-à-dire accessibles et modifiables par d'autres concepteurs autorisés. Cette histoire est à rapprocher des choix faits aux débuts du réseau Internet, quand une petite communauté d'universitaires décida de construire une plateforme ouverte qui supposait que tout le monde se comporterait honnêtement. Cette hypothèse n'a pas résisté à la croissance d'Internet.

Aujourd'hui, la conception d'un seul circuit intégré peut mettre à contribution des milliers de personnes travaillant sur des sites répartis sur plusieurs continents. Un fabricant des États-Unis peut combiner des blocs issus de plusieurs de ses filiales avec d'autres provenant de fournisseurs américains, européens ou indiens, puis faire fabriquer la puce dans une usine chinoise. Ces réseaux mondiaux se sont imposés ces dernières années et ont permis de réduire les coûts et d'améliorer la productivité. En revanche, assurer la sécurité dans ces conditions est bien plus compliqué qu'à

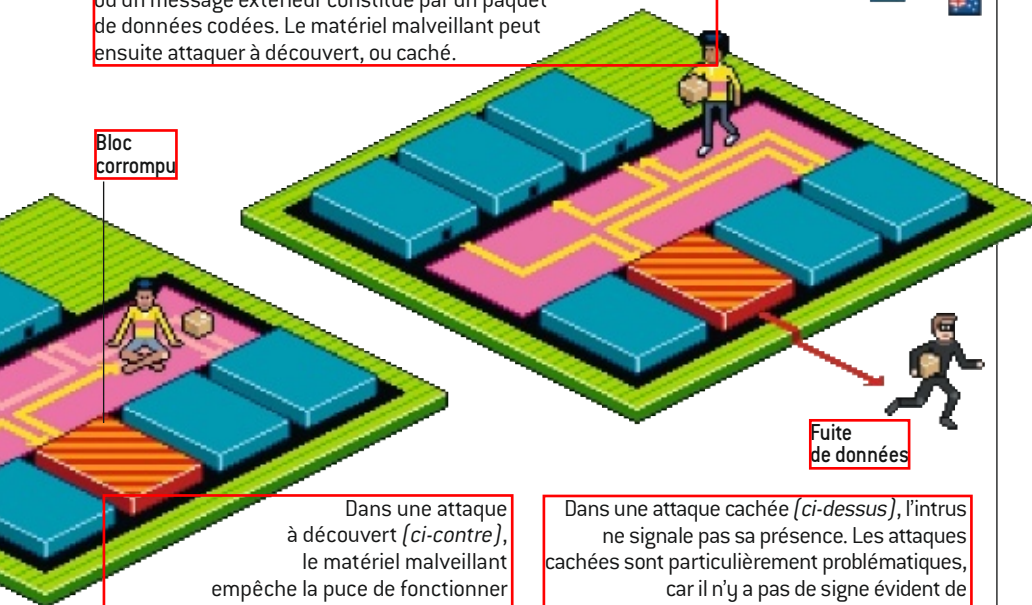
Quand les choses se passent mal

Une puce contenant un intrus matériel fonctionne normalement jusqu'à ce que ce dernier soit activé par un événement déclencheur, qui constitue l'ordre d'attaquer.

Ces activateurs peuvent être une heure d'une date donnée, ou un message extérieur constitué par un paquet de données codées. Le matériel malveillant peut ensuite attaquer à découvert, ou caché.



Bloc corrompu



Dans une attaque à découvert (*ci-contre*), le matériel malveillant empêche la puce de fonctionner correctement. Dans cet exemple, un bloc corrompu refuse de rendre aux autres blocs l'accès au bus, ce qui empêche les blocs de communiquer entre eux. Dans ce cas, toute la puce cesse de fonctionner.

Dans une attaque cachée (*ci-dessus*), l'intrus ne signale pas sa présence. Les attaques cachées sont particulièrement problématiques, car il n'y a pas de signe évident de dysfonctionnement. Cependant, en sous-main, le circuit malveillant peut transmettre des données confidentielles à un site externe, ou travailler avec d'autres systèmes corrompus pour lancer d'autres attaques.

Dans la réalité, les mesures prises pour sécuriser la conception et la fabrication des circuits intégrés ne sont jamais parfaites.

L'AUTEUR



John VILLASENOR est chercheur au Département de génie électrique de l'Université de Californie à Los Angeles.

L'époque où tout était fait sur un seul site. Il n'est pas improbable qu'un tiers non autorisé accède à la conception en cours et la corrompe sans que cela soit détecté. Il y a aussi un risque faible, mais non négligeable, que l'élaboration de la puce soit dénaturée par une personne légitimement inscrite dans le processus.

Sécuriser les circuits

Idéalement, les pirates ne devraient jamais avoir l'occasion d'accéder au circuit intégré durant sa conception et sa fabrication. Si toutes les étapes de la chaîne étaient effectuées par des entreprises et des personnes dignes de confiance, dans un environnement sécurisé, et si les puces étaient testées de façon exhaustive, alors – du moins en théorie – le risque qu'un agent malveillant s'en prenne à un élément du circuit serait quasi nul. C'est cette stratégie que l'Agence du Pentagone pour les projets de recherche avancée de défense, la DARPA (*Defense Advanced Research Pro-*

jects Agency), a mise en avant avec son programme *Trust in Integrated Circuits* (Confiance dans les circuits intégrés). Cependant, dans la réalité, les mesures prises pour sécuriser la conception des circuits ne sont jamais parfaites.

En plus des mesures de protection en amont, les concepteurs de matériel doivent construire des circuits qui identifient les attaques et y répondent au moment où elles ont lieu. On peut voir cela comme une sorte de force de police urbaine : si une ville se doit de prendre toutes les mesures raisonnables visant à prévenir les délits, ces efforts ne seront jamais efficaces à 100 pour cent ; elle doit aussi disposer d'une police capable de réagir vite et de façon pertinente quand des délits sont effectivement commis.

Une puce capable de détecter des attaques et d'y répondre est nommée circuit sécurisé. Elle peut intégrer une circuiterie supplémentaire conçue spécialement pour surveiller son fonctionnement et rechercher des comportements

COMMENT CONTRER LES ATTAQUES MATÉRIELLES

Un circuit intégré sécurisé contient quelques éléments de circuit supplémentaires qui maintiennent l'ordre à l'intérieur de la puce. Quand un comportement hostile est détecté, un ensemble de mesures de sécurité peut être appliqué en quelques microsecondes pour identifier la source de l'attaque et la surmonter. Voici quelques stratégies en cours de développement.



Mesure de sécurité	Ce qu'elle empêche	Comment elle marche
Portier de la mémoire	Toute tentative de la part d'un bloc malveillant de dépasser les limites de sa mémoire propre, ce qui entrave l'espionnage ou la corruption de données.	Un portier assure qu'un bloc n'accède qu'aux parties autorisées de la mémoire, et signale toute tentative d'accès non autorisé.
Bus système sécurisé	Une prise de contrôle malveillante du bus système qui pourrait avoir pour conséquence un arrêt total du circuit ou un ralentissement majeur du fonctionnement.	Le bus analyse des motifs statistiques d'accès au bus par les différents blocs fonctionnels et signale les comportements étranges.
Dispositif de surveillance d'entrée/sortie	L'espionnage à couvert – lorsque la puce essaye de copier des données vers un site hors de la puce.	Le circuit analyse les mouvements de données sur la puce et vers l'extérieur, et compare ce flux avec le motif attendu, signalant toute aberration.
Test de bloc sur place	Une attaque de cheval de Troie matériel qui tente d'endommager un bloc initialement « sain ».	Un vérificateur d'intégrité de puces teste de temps à autre les blocs pour s'assurer qu'ils continuent de fonctionner comme prévu.
Circuits logiques programmables additionnels	Permet au circuit de mettre en quarantaine un bloc contaminé et d'assumer sa fonction.	Les circuits additionnels sont configurés pour remplacer le bloc fonctionnel mis en quarantaine – bien que vraisemblablement à une vitesse plus faible.
Système d'alerte d'attaque	Permet aux autres circuits de se protéger de façon préventive contre des attaques imminentes.	Un circuit attaqué met en place des contre-mesures et envoie un avertissement aux autres dispositifs contenant le même circuit.

qui pourraient révéler une attaque matérielle. Si une attaque est soupçonnée, le circuit sécurisé identifiera le type d'attaque et prendra les mesures nécessaires pour minimiser les dommages qui en résulteraient.

Dans le cas d'un téléphone mobile paralysé, la panne peut être liée au dysfonctionnement d'un seul bloc d'un circuit intégré. Ce bloc interagit avec tous les autres blocs *via* le bus système. Lequel est lui-même contrôlé par un arbitre de bus, un « agent de la circulation » qui détermine quelles informations peuvent y transiter et à quel moment. Cependant, cette analogie n'est pas parfaite. Alors qu'un agent de la circulation peut ordonner au trafic de démarrer et de s'arrêter, un arbitre de bus n'a pas cette autorité. Il peut donner la permission à un bloc de démarrer, mais le bloc garde ce droit aussi longtemps qu'il veut – héritage de la vieille idée qu'un bloc se comporte toujours correctement. C'est là que réside le problème.

Dans un système habituel, un bloc garde l'accès au bus aussi longtemps qu'il en a besoin, avant de rendre ce droit pour que les autres blocs en profitent. L'arbitre de bus « voit » que le bus système est disponible, et l'assigne à un autre bloc. Mais si un bloc garde le contrôle du bus indéfiniment, de nouvelles données ne pourront plus se déplacer dans le circuit intégré, lequel se bloquera.

Mise en quarantaine

Au contraire, un circuit intégré sécurisé effectue en permanence des vérifications pour s'assurer que les communications entre les différents blocs ne sont pas perturbées. Quand il détecte qu'un bloc monopolise l'accès au bus, il réagit en mettant en quarantaine le bloc menaçant. Il peut ensuite utiliser sa réserve de circuits programmables pour remplacer la fonctionnalité perdue. Ce mécanisme a de fortes chances de ralentir l'équipement, mais il lui permet au moins de continuer à fonctionner.

Cependant, la menace la plus pernicieuse n'est vraisemblablement pas le cas simple où une attaque matérielle met le système hors d'usage. Il peut arriver que l'équipement donne l'impression de fonctionner normalement, alors qu'il agit en réalité à des fins malveillantes. Dans le cas des mobiles, par exemple, le téléphone peut commencer à secrètement

transmettre une copie de tous les messages entrants et sortants à une tierce partie. Un observateur sans méfiance ne remarquerait rien, et l'attaque pourrait continuer indéfiniment.

Dans ce cas particulier, une puce sécurisée surveillerait en permanence la quantité et le type de données entrant et quittant le circuit intégré et comparerait statistiquement le flux d'informations avec celui attendu. Toute anomalie serait signalée comme une fuite potentielle de données, et la puce pourrait alerter l'utilisateur ou commencer à la juguler.

Outre qu'il peut lutter contre les effets des intrus sur son propre fonctionnement, un circuit intégré sécurisé peut signaler aux équipements voisins le type d'attaque et leur permettre ainsi de prendre des mesures préventives pour l'éviter (ou du moins minimiser ses effets). Un tel système de notification n'est pas aussi irréaliste qu'on pourrait le croire, presque tous les systèmes étant plus ou moins connectés. Par exemple, si un circuit sous attaque est en mesure d'identifier le message activateur responsable de la défaillance, il peut alerter les autres circuits pour qu'ils filtrent ce déclencheur.

Les mesures décrites ici ne seront effectives que si les parties du circuit responsables de la gestion de la sécurité sont elles-mêmes sécurisées et dignes de confiance. C'est comme si, pour sécuriser un circuit, il fallait sécuriser sa sécurité. Mais les éléments d'un circuit dédiés à la sécurité ne représentent qu'une petite fraction de la conception globale. Ces éléments peuvent être conçus sur place pour que seuls des intervenants vraiment dignes de confiance y aient accès.

Un compromis entre efficacité et sécurité

Grâce aux efforts des gouvernements, des chercheurs et des entreprises, d'importants progrès ont été réalisés dans la sécurité d'Internet. On ne peut pas en dire autant de l'infailibilité des circuits intégrés, qui en est à peu près au même stade que la sécurité d'Internet il y a 15 ans : la prise de conscience du problème va croissant, mais les stratégies défensives n'ont pas encore été complètement élaborées, et encore moins mises en pratique.

Une approche de lutte complète contre les attaques matérielles par les chevaux de Troie matériels nécessite des

actions à plusieurs niveaux. Les stratégies qui visent à ce qu'aucun matériel compromis ne voie jamais le jour, comme l'initiative de la DARPA, représentent un bon début. Cependant, il est plus important encore de commencer à mettre en œuvre des mesures de conception sécurisée, seules à même d'assurer une défense contre des attaques en cours. Ces mesures demanderont du temps, de l'argent et des efforts. Différents compromis possibles entre efficacité, sécurité et coût permettront d'obtenir un bon niveau de protection pour des coûts acceptables.

Mon équipe, à l'Université de Californie à Los Angeles, a montré qu'il suffit d'augmenter la taille de la puce de quelques centièmes pour y ajouter une circuiterie de défense. La vitesse de fonctionnement baisse un peu, étant donné que les mesures prises pour vérifier le comportement des blocs fonctionnels consomment des ressources du système qui seraient normalement utilisées pour effectuer la tâche en cours.

LA SÉCURISATION DES CIRCUITS INTÉGRÉS

devra sans cesse innover pour garder une longueur d'avance sur les dernières attaques matérielles.

Toutefois, les ralentissements sont relativement faibles, voire inexistant, si les mesures de sécurité sont effectuées en utilisant une part des circuits et des unités fonctionnelles inactives.

Inévitablement, la lutte contre les attaques matérielles va devenir une course aux armements comparable à celle que l'on a connue dans l'univers du logiciel. La sécurisation des circuits devra innover continuellement pour garder une longueur d'avance sur les dernières attaques. Pour contrer les failles de sécurité détectées dans les logiciels, il suffit d'aller chercher le remède sur Internet. Il est impossible de télécharger de la même manière du matériel de dépannage. Toutefois, les circuits intégrés modernes peuvent être reconfigurés en partie. Si l'on ajoute des mesures judicieuses au processus de conception, il est envisageable de remplacer automatiquement des parties d'un circuit qui auraient été mises hors d'usage. La flexibilité de la conception est notre meilleure défense. Même si les attaques matérielles sont inévitables, nous ne sommes pas condamnés à les voir réussir. ■

Les puces en chiffres

✓ 1 550

Le nombre estimé d'entreprises dans le monde impliquées dans la conception de circuits intégrés : 700 en Amérique du Nord, 600 en Asie et 250 en Europe, au Moyen-Orient et en Afrique.

✓ 2 500

Le nombre approximatif de nouvelles puces conçues chaque année.

✓ 180

La recette globale des ventes de semi-conducteurs en 2009, en milliards d'euros.

✓ BIBLIOGRAPHIE

L. Kim, J. Villasenor et C. Koc, *A trojan-resistant system-on-chip bus architecture*, *Proceedings of the 2009 IEEE Military Communications Conference*, Boston, octobre 2009.

W. K. Clark et P. L. Levin, *Securing the information highway*, *Foreign Affairs*, novembre-décembre 2009.

D. Agrawal et al., *Trojan detection using IC fingerprinting*, *Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Security and Privacy*, Berkeley, mai 2007.

Pourquoi l'homme n'a plus de fourrure

Nina Jablonski

De récentes découvertes dévoilent pourquoi et quand les hominidés, contrairement aux autres primates, ont perdu leur fourrure. Et l'apparition d'une peau quasi nue aurait favorisé l'émergence d'autres caractéristiques humaines.

L'ESSENTIEL

- ✓ La fourrure réchauffe le corps et protège de l'humidité, des rayons du soleil et des microbes.
- ✓ Pourtant, l'homme en est dépourvu, mais il est équipé d'un dispositif maintenant sa température corporelle constante, même quand son organisme s'échauffe longtemps.
- ✓ En effet, sa transpiration est unique et efficace ; elle évacue bien l'excès de chaleur, notamment parce que sa peau est quasi nue.
- ✓ Les scientifiques en ont déduit que les longs trajets entrepris par les premiers hommes auraient favorisé la sélection d'une peau sans fourrure.

L'homme est un primate, mais il est le seul à avoir une peau presque glabre. Tous les autres primates présentent une fourrure dense, par exemple le pelage noir du singe hurleur ou le manteau couleur cuivrée de l'orang-outan. C'est aussi le cas de la plupart des autres mammifères. L'homme a des poils sur la tête et en quelques autres endroits, mais, comparé à ses proches parents, même le plus poilu des hommes ne l'est guère.

Pourquoi l'homme n'a-t-il pas de fourrure ? Cela fait des siècles que les scientifiques réfléchissent à cette question, en vain. Dans l'évolution humaine, la plupart des transitions importantes, telle l'émergence de la bipédie, sont inscrites dans les fossiles des ancêtres. Mais aucun des restes connus n'a conservé de traces de peau humaine.

Toutefois, depuis quelques années, des chercheurs ont remarqué que les fossiles contiennent des preuves indirectes de la transformation de la peau humaine. Grâce à ces indices et aux éléments obtenus depuis dix ans en génétique et en physiologie, nous sommes parvenus à expliquer pourquoi les êtres humains ont perdu leur fourrure, et quand cela s'est produit. En outre, notre scénario suggère que l'apparition d'une peau quasi glabre a participé à l'évolution d'autres traits caractéristiques de l'homme, notamment son cerveau très développé.

Pour comprendre pourquoi les ancêtres de l'homme ont perdu leur fourrure, voyons d'abord pourquoi d'autres espèces en ont une. Les poils sont un revêtement corporel spécifique des mammifères. En



Don't miss

fait, ils en définissent la classe: tous les mammifères présentent au moins quelques poils et la plupart en sont abondamment pourvus. Les poils sont de bons isolants thermiques et protègent le corps contre l'abrasion, l'humidité, les rayons du soleil, les parasites et les microbes pathogènes. Ils servent aussi de camouflage pour tromper les prédateurs, et les motifs de la fourrure permettent aux individus d'une même espèce de se reconnaître.

Les rôles de la fourrure

Qui plus est, les mammifères peuvent utiliser leur fourrure comme un signal social – un mode de communication non verbale – pour indiquer par exemple de l'agressivité ou de l'agitation. Quand un

chien hérisse ses poils, il indique à ceux qui le défient de ne pas s'approcher.

Cependant, même si la fourrure a plusieurs fonctions, quelques lignées de mammifères ont acquis au fil du temps une fourrure si clairsemée et aux poils si fins qu'elle n'a plus aucun rôle. La plupart de ces animaux vivent sous terre ou dans l'eau. Chez les mammifères souterrains, tel le rat-taupo, l'apilosité – l'absence de poils – a évolué en réponse à la vie souterraine. Dans ce cas, les poils sont superflus, car les animaux ne se voient pas dans le noir, mais ils se blottissent les uns contre les autres pour se réchauffer.

Chez les mammifères marins qui ne s'aventurent jamais sur terre, telles les baleines, la peau lisse facilite la nage et la plongée, en diminuant les forces de

frottement de l'eau sur la peau. Pour compenser l'absence d'isolation thermique externe, ces animaux ont une couche de graisse sous la peau. En revanche, les animaux semi-aquatiques, par exemple les loutres, ont une fourrure dense étanche, qui emprisonne l'air pour permettre à l'animal de flotter plus facilement. Cette fourrure protège aussi la peau sur le sol.

Les plus grands mammifères terrestres, à savoir les éléphants, les rhinocéros et les hippopotames, ont également une peau nue, si bien qu'ils n'ont pas trop chaud. En effet, plus un animal est grand, plus sa surface corporelle est petite relativement à sa masse, et plus il a des difficultés à évacuer l'excès de chaleur interne. Au Pléistocène – il y a entre deux millions et 10 000 ans –, les mammoths et autres parents des éléphants et des rhinocéros avaient de la fourrure, ce qui leur permettait de vivre dans des environnements froids. Leur isolation externe les aidait à conserver la chaleur du corps et à réduire leurs besoins alimentaires.

Évacuer la chaleur grâce à une transpiration efficace

La peau quasi nue de l'homme n'est pas une adaptation à la vie souterraine ou aquatique, bien que certains pensent à tort que les ancêtres de l'homme soient passés par une phase aquatique au cours de leur évolution (voir l'encadré page 65). Elle n'est pas non plus le résultat d'une grande taille. La peau est devenue presque glabre parce que l'homme a acquis un système de régulation efficace de sa température corporelle. C'est en tout cas ce que suggère l'efficacité de la transpiration humaine.

Garder une température corporelle basse est difficile pour de nombreux mammifères, et pas seulement pour les plus grands d'entre eux, en particulier lorsqu'ils vivent dans des régions chaudes et produisent beaucoup de chaleur en marchant et en courant longtemps. Ces animaux doivent réguler leur température interne, leurs tissus et organes, notamment le cerveau, pouvant être endommagés par un excès de chaleur.

Les mammifères utilisent différentes tactiques pour diminuer leur température interne: les chiens halètent, plusieurs espèces de félins sont plus actives la nuit

quand il fait plus frais, et beaucoup d'antilopes peuvent transférer la chaleur du sang artériel vers le sang veineux, rafraîchi lors de son passage dans les naseaux. Mais chez les primates, y compris l'homme, la principale stratégie est la transpiration. Elle rafraîchit l'organisme en produisant à la surface de la peau un liquide, la sueur, qui s'évapore et, ce faisant, évacue de l'énergie thermique. Ce mécanisme de rafraîchissement est très efficace et évite une surchauffe des organes et des tissus.

Mais la sueur diffère selon les espèces. La peau des mammifères contient trois types de glandes sudoripares (qui produisent la sueur) : les glandes sébacées, apocrines et eccrines. Les glandes sébacées et apocrines dominent chez la plupart des espèces. Situées près des follicules pileux – là où naît le poil –, elles produisent un mélange huileux qui enrobe le poil. Cette sueur rafraîchit un peu l'animal à fourrure, mais sa capacité à dissiper la chaleur est faible.

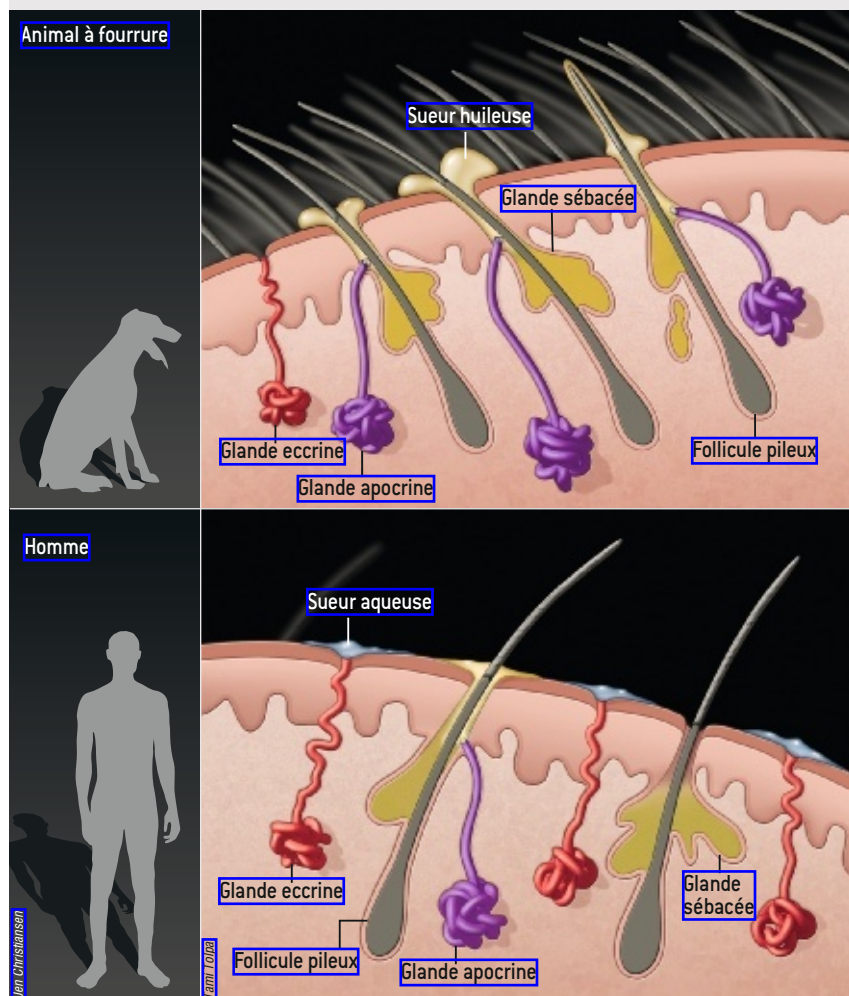
Il y a près de 20 ans, Edgar Folk, de l'Université de l'Iowa aux États-Unis, et ses collègues ont montré que l'efficacité du rafraîchissement diminue à mesure que la fourrure de l'animal se mouille et s'emmêle sous l'effet de cette sueur épaisse et huileuse. En effet, dans ce cas, l'évaporation a lieu à la surface de la fourrure et non à la surface de la peau, ce qui réduit le transfert de chaleur. Pour compenser cette perte d'efficacité thermique et se rafraîchir, l'animal doit boire beaucoup d'eau et réduire ses déplacements.

TRANSPIRER SANS FOURRURE

La peau humaine, dépourvue de fourrure, évacue mieux l'excès de chaleur de l'organisme qu'une peau couverte de fourrure. Les mammifères possèdent trois types de glandes sudoripares : les glandes apocrines, sébacées et eccrines. Chez la plupart des mammifères, la couche la plus externe de la peau, nommée épiderme, contient un grand nombre de glandes apocrines, regroupées autour des follicules pileux. Ces glandes, avec les glandes sébacées, enrobent les poils de la fourrure d'une sueur huileuse. L'évaporation de cette sueur, qui rafraîchit l'animal en évacuant la chaleur de la peau, se produit à la surface de la fourrure. Cependant, plus l'animal transpire, moins l'élimination de la chaleur est efficace, parce que la fourrure s'emmêle et gêne l'évaporation. En revanche, dans l'épiderme humain, ce sont les glandes eccrines qui prédominent. Ces glandes, situées près de la surface de la peau, libèrent une sueur fluide et aqueuse par de minuscules pores. Outre son évaporation directe sur la peau, cette sueur s'évapore plus facilement que la sueur apocrine, améliorant ainsi le rafraîchissement.

Outre l'absence de fourrure, l'homme possède de nombreuses glandes eccrines, entre deux et cinq millions. Ces glandes peuvent produire jusqu'à 12 litres de sueur aqueuse par jour. Elles ne se trouvent pas près des follicules pileux, mais près de la surface de la peau où elles libèrent la sueur à travers de minuscules pores (voir l'encadré ci-contre). La combinaison d'une peau presque nue et d'une sueur fluide qui se répand à sa surface, au lieu de s'accumuler dans une fourrure, permet à l'homme d'éliminer efficacement la chaleur en excès.

En fait, en 2007, Daniel Lieberman, de l'Université Harvard, et Dennis Bramble, de l'Université de l'Utah, ont montré que le système de refroidissement de l'homme est si efficace que lors d'un marathon, un jour de forte chaleur, l'homme gagnerait contre un cheval.



Une alimentation et un climat différents

L'homme est le seul primate sans fourrure doté de nombreuses glandes eccrines. Qu'est-ce qui a favorisé l'émergence d'une peau presque nue et transpirante au moment où la lignée des ancêtres de l'homme moderne a divergé de celle qui a conduit à son plus proche parent, le chimpanzé ? La transformation aurait commencé lors d'un changement climatique.

Grâce à des fossiles d'animaux et de plantes, les scientifiques ont reconstitué les anciennes conditions écologiques. Il y a environ trois millions d'années, la Terre est entrée dans une phase de refroidissement, qui a asséché l'Afrique orientale et centrale où vivaient les ancêtres de l'homme. Avec cette diminution des précipitations, les environnements boisés des premiers hominidés ont laissé place à des prairies de savane ouvertes, et les aliments qui assuraient la subsistance des

australopithèques, à savoir les fruits, les feuilles, les tubercules et les graines, sont devenus rares et disponibles en certaines saisons seulement, comme ce fut le cas pour les sources d'eau douce. En réaction à cette diminution des ressources, les ancêtres de l'homme ont dû abandonner leurs habitudes sédentaires pour un mode de vie plus actif. Ils ont recherché de la nourriture et de l'eau en parcourant des trajets de plus en plus longs.

C'est aussi à ce moment-là que les hominidés ont commencé à introduire la viande dans leur alimentation, comme en attestent des outils en pierre et en os d'animaux datant d'il y a environ 2,6 millions d'années. Les aliments carnés sont plus riches en calories que les aliments d'origine végétale, mais ils sont plus rares. Les animaux carnivores doivent donc parcourir un plus vaste territoire que les herbivores pour se procurer assez de nourriture.

Une activité intense

En outre, les proies animales bougent, ce qui signifie que les prédateurs doivent dépenser plus d'énergie pour obtenir leur repas. Ainsi, le corps des hominidés chasseurs ou charognards, qui passaient encore du temps dans les arbres, était proche de celui des grands singes, mais il a évolué en un corps muni de longues jambes, adapté à la marche et à la course soutenues.

Toutefois, cette augmentation importante de l'activité des hominidés avait un prix : une élévation de la température corporelle et un risque de surchauffe. Au début des années 1980, Peter Wheeler, de l'Université John Moore de Liverpool, en Angleterre, a simulé la chaleur à laquelle les ancêtres de l'homme ont dû résister dans la savane. En 1994, en utilisant ses résultats, nous avons montré que l'intensification de la marche et de la course, au cours desquelles l'activité musculaire produit beaucoup de chaleur,

L'intensification de la marche et de la course aurait nécessité que les hominidés perdent leur fourrure.

aurait nécessité que les hominidés perdent leur fourrure et améliorent leur capacité de transpiration eccrine pour éviter la surchauffe.

Quand cette métamorphose s'est-elle produite ? Grâce aux fossiles, on a une idée approximative de l'époque à laquelle les ancêtres de l'homme ont commencé à adopter des modes de locomotion modernes. Des études indépendantes de D. Lieberman et de Christopher Ruff, de l'Université Johns Hopkins aux États-Unis, ont montré qu'il y a environ 1,6 million

d'années, un premier membre du genre humain, nommé *Homo ergaster*, avait acquis des proportions corporelles modernes favorisant des marches et des courses prolongées (voir l'encadré page 66).

En outre, des détails des surfaces articulaires de la cheville, du genou et de la hanche montrent que ces hominidés pratiquaient effectivement de telles activités. En conséquence, selon les preuves fossiles, la transition vers la peau nue et un système de transpiration eccrine devait déjà être amorcée il y a 1,6 million d'années pour compenser les excès de chaleur corporelle qui accompagnaient le nouveau mode de vie plus actif des hominidés.

Les recherches en génétique sur la couleur de la peau fournissent un autre indice pour dater l'émergence de la peau presque glabre. En 2004, Alan Rogers, de l'Université de l'Utah aux États-Unis, et ses collègues ont examiné des séquences du gène humain *MC1R*, qui participe à la pigmentation de la peau. L'équipe a montré qu'un variant particulier du gène, toujours présent chez les Africains à pigmentation foncée, est apparu il y a 1,2 million d'années. On pense que les premiers ancêtres humains avaient une peau rosée couverte d'une fourrure noire, un peu comme les chimpanzés aujourd'hui ; après la perte de la fourrure, l'acquisition d'une peau foncée, faisant écran au soleil, aurait été une évolution indispensable.

Mais comment les hominidés ont-ils évolué après avoir perdu leur fourrure ?

La théorie du primate aquatique n'est pas valable

Parmi les différentes théories qui tentent d'expliquer l'évolution de la peau chez l'homme, la théorie du primate aquatique a le plus attiré l'attention et a reçu le plus grand soutien. Selon cette théorie, les hommes sont passés par une phase aquatique au cours de leur évolution.

Énoncée pour la première fois par le zoologiste anglais sir Alister Hardy en 1960, la théorie du primate aquatique a ensuite été soutenue par l'écrivain Elaine Morgan, qui continue à la promouvoir dans ses cours et ses écrits. Pourtant, cette théorie est fautive.

La théorie du primate aquatique prétend qu'il y a environ cinq à

sept millions d'années, le bouleversement tectonique de la vallée du rift, en Afrique de l'Est, a coupé les premiers ancêtres de l'homme de leurs environnements favorables, les forêts tropicales.

Ces hommes ont donc dû s'adapter à une vie semi-aquatique dans les marais, le long des côtes et dans les plaines inondables, où ils ont vécu pendant près d'un million d'années. E. Morgan voit des preuves de cette phase aquatique dans plusieurs caractéristiques anatomiques que les hommes ont en commun avec des mammifères aquatiques et semi-aquatiques, mais pas avec ceux de la savane. Ces traits communs sont notamment la peau

nue, un faible nombre de glandes sudoripares apocrines et une couche de graisse sous la peau.

Mais la théorie du primate aquatique est indéfendable pour trois raisons principales. Premièrement, les mammifères aquatiques diffèrent déjà beaucoup entre eux quant à la présence de ces caractéristiques aquatiques mentionnées par E. Morgan. En conséquence, il n'existe pas de relation simple entre la quantité de poils que présente un animal et l'environnement dans lequel il vit. Deuxièmement, les données fossiles montrent que les habitats aquatiques étaient envahis de crocodiles et d'hippopotames. Les ancêtres de l'homme n'auraient eu

aucune chance de survivre face à de telles créatures. Troisièmement, cette théorie est trop complexe. Elle soutient que les hommes sont passés d'un mode de vie terrestre à un mode semi-aquatique, puis seraient revenus vivre sur la terre ferme. John Langdon, de l'Université d'Indianapolis aux États-Unis, défend une interprétation plus simple des données fossiles : les hommes ont toujours vécu sur la terre ferme et le changement climatique, qui a favorisé l'extension des prairies de la savane aux dépens des forêts, aurait permis à l'homme d'évoluer vers une peau quasi nue. D'un point de vue scientifique, l'explication la plus simple est souvent la meilleure.

DE LONGUES JAMBES POUR PARCOURIR DE GRANDES DISTANCES

Bien que les données fossiles ne préservent aucune trace directe de la peau humaine, les scientifiques peuvent estimer à quelle époque se situe l'apparition de la peau quasi nue en étudiant d'autres indices fossiles. Les préhumains, tels que les australopithèques (à gauche), avaient probablement des vies sédentaires, à l'instar des grands singes aujourd'hui, car ils vivaient près d'environnements boisés riches en végétaux et en eau douce. Cependant, quand les forêts se sont réduites et que les prairies se sont étendues, les ancêtres qui leur ont succédé, tel *Homo ergaster* (à droite), ont dû parcourir des distances de plus en plus importantes pour trouver de la nourriture, notamment de la viande. Ces hominidés, apparus il y a 1,6 million d'années, étaient probablement les premiers à avoir une peau presque nue et une sueur eccrine ; cela leur aurait permis d'évacuer la chaleur corporelle engendrée par une activité physique importante.

Australopithecus afarensis, représenté ici par le fossile de Lucy datant d'il y a 3,2 millions d'années, ressemblait aux grands singes avec ses membres courts peu adaptés au parcours de longues distances.



Dr. F. J. Beckert - American Museum of Natural History



Les preuves génétiques de l'évolution de la nudité sont rares, car de nombreux gènes participent à l'apparence et aux fonctions de la peau. Néanmoins, quelques indices ont émergé quand les scientifiques ont comparé les séquences ADN des génomes de différents organismes. Par exemple, l'une des différences les plus importantes entre l'ADN du chimpanzé et celui de l'homme réside dans les gènes codant des protéines qui contrôlent les propriétés de la peau. Les variants humains de certains de ces gènes codent des protéines qui rendent la peau étanche à l'eau et résistante aux éraflures, des propriétés importantes en l'absence de fourrure. L'apparition de ces variants aurait contribué à l'origine de la nudité en atténuant ses conséquences.

La peau humaine est une barrière importante, grâce à la structure et à la composition de sa couche la plus externe, la couche cornée de l'épiderme. Cette couche contient plusieurs épaisseurs de cellules mortes aplaties qui renferment de la kératine – une protéine fibreuse – et d'autres substances. En outre, des couches ultra-minces de lipides entourent chacune de ces cellules.

La plupart des gènes contrôlant le développement de la couche cornée sont anciens et leurs séquences sont très conservées chez les vertébrés (elles n'ont pas changé avec le temps). Mais les gènes déterminant la structure de la couche cor-

Lutter contre la chaleur

✓ Une peau sans fourrure n'est pas la seule adaptation que les hommes ont acquise pour réguler la température de leur organisme dans l'environnement chaud où ils vivaient. Ils ont aussi développé des membres plus longs, augmentant leur rapport surface/volume, ce qui facilite l'évacuation de la chaleur. Cette tendance semble se poursuivre aujourd'hui. En effet, les populations d'Afrique de l'Est, tels les Dinka du Sud du Soudan, vivent dans l'un des endroits les plus chauds de la Terre et ils ont des jambes extrêmement longues. Pourquoi les êtres humains modernes ont-ils des membres aux proportions si variées ? Quand les premiers hominidés ont migré d'Afrique tropicale vers des régions du monde moins chaudes, les pressions sélectives ont changé, permettant l'évolution de toute une variété de corpulences.

née humaine sont particuliers : leur apparition était probablement importante pour la survie. Ces gènes codent une combinaison unique de protéines qui ne sont présentes que dans l'épiderme, par exemple de nouveaux types de kératine. Plusieurs équipes tentent aujourd'hui de comprendre les mécanismes de la fabrication de ces protéines.

D'autres scientifiques étudient l'évolution des kératines des poils corporels, pour déterminer pourquoi les poils de la peau humaine sont épars et fins. En 2008, Roland Moll et ses collègues, de l'Université Philipps à Marburg en Allemagne, ont montré que les kératines des poils corporels humains sont fragiles : ces derniers cassent facilement comparés à ceux d'autres animaux. Cela suggère que les kératines des poils humains n'étaient pas aussi importantes pour la survie que les kératines des poils d'autres primates.

Les généticiens tentent aussi de savoir comment la peau humaine a développé une telle abondance de glandes eccrines. Cette accumulation résulterait de modifications dans les gènes qui déterminent le devenir des cellules souches – des cellules non différenciées – chez l'embryon. Au début du développement, des groupes de cellules souches de l'épiderme dans des sites spécifiques interagissent avec des cellules du derme sous-jacent, et des signaux chimiques particuliers commandent la différenciation des cel-

Homo ergaster fut le premier hominidé à avoir de longues jambes (permettant de grandes enjambées), comme on peut les observer ici sur le squelette de l'adolescent de Turkana, datant d'il y a 1,6 million d'années. Ces membres allongés facilitaient les marches et les courses prolongées.



D. Finnie and J. Beckert, American Museum of Natural History



cules souches en follicules pileux, glandes eccrines, glandes apocrines, glandes sébacées ou autres cellules de l'épiderme. Plusieurs équipes étudient comment ces niches de cellules souches épidermiques s'établissent et se maintiennent. Ces travaux devraient clarifier ce qui détermine le destin des cellules épidermiques embryonnaires et comment davantage de ces cellules deviennent des glandes sudoripares eccrines chez l'homme.

Des zones préservées, une pilosité variée

Toutefois, l'évolution a conservé quelques parties du corps humain couvertes. La raison pour laquelle les hommes ont perdu leur fourrure doit aussi expliquer pourquoi ils en ont conservé à certains endroits.

Les poils sous les aisselles et pubiens faciliteraient la propagation des phéromones – des composés chimiques qui déclenchent une réaction comportementale chez de potentiels partenaires sexuels – et permettraient de lubrifier des régions nécessaires à la locomotion. Quant aux cheveux, ils auraient été conservés pour éviter une chaleur excessive au sommet de la tête. Cela semble paradoxal, mais une épaisse chevelure crée une couche d'air entre le cuir chevelu transpirant et la surface chaude des cheveux. Ainsi, les jours de fort soleil, les cheveux absorbent la chaleur, tandis que la barrière d'air reste

plus fraîche, permettant à la sueur du cuir chevelu de s'évaporer dans la couche d'air.

Des cheveux bouclés sont les plus efficaces, car ils augmentent l'épaisseur de l'espace entre la surface des cheveux et le cuir chevelu, permettant à l'air d'y circuler. L'évolution de la chevelure humaine reste à élucider, mais il est probable que les premiers hommes ont eu des cheveux très bouclés, et que d'autres types de cheveux aient été sélectionnés quand l'homme a atteint de nouveaux territoires, loin de l'Afrique tropicale.

Qu'en est-il des poils sur le corps ? Pourquoi existe-t-il une telle variabilité

entre les hommes ? Dans de nombreuses populations, les individus ont très peu de poils corporels et quelques populations présentent des personnes hirsutes. En général, les populations ayant le moins de poils corporels vivent sous les tropiques, alors que les plus poilues vivent plutôt dans des régions moins chaudes. Pourtant, les poils ne tiennent pas vraiment chaud...

Ces différences de pilosité sont en partie dues à la testostérone, une hormone sexuelle masculine, car, quelle que soit la population, les hommes ont davantage de poils corporels que les femmes. Plusieurs

Des poux sur les vêtements

Ces dernières années, on a étudié les poux pour rechercher des indices qui expliqueraient pourquoi les hommes ont perdu leur fourrure. En 2003, Mark Pagel, de l'Université Reading en Angleterre, et Walter Bodmer, de l'Hôpital John Radcliffe à Oxford, ont proposé que les hommes ont perdu leur fourrure pour débarrasser leur corps des poux, qui transmettent des maladies, et d'autres parasites installés dans la fourrure ; cela permettrait en outre d'exposer la bonne santé de la peau.

Mais d'autres chercheurs, qui ont étudié les poux de la tête et du corps, ont découvert combien de temps s'est écoulé entre l'apparition d'une peau presque nue chez les premiers hommes et le moment où ils ont commencé à porter des vêtements. Bien qu'ils se nourrissent de sang, les poux de corps vivent sur les vêtements (alors que les poux de tête vivent dans les cheveux). L'origine des poux de corps fournit donc une estimation de la date d'apparition des vêtements chez les hominidés. En comparant les séquences de gènes de divers organismes, les chercheurs peuvent estimer quand une espèce est apparue. Ces études, réalisées chez les poux, indiquent que les poux de tête vivaient avec les premiers hommes sans fourrure, tandis que les poux de corps sont apparus plus tard. La chronologie de leur apparition indique que les hommes étaient nus pendant plus d'un million d'années avant de se vêtir.



Mark Wilson/Getty Images

LA FOURRURE D'UN ANIMAL transmet des signaux sociaux importants qui interviennent dans la communication. Par exemple, des poils hérissés indiquent une agression ou les motifs d'une robe permettent aux membres d'une même espèce de se reconnaître. Les



Mark Wilson/Getty Images

hommes compensent l'absence de fourrure en décorant leur corps de tatouages, de bijoux et d'autres ornements. Ils ont aussi des expressions faciales complexes, ainsi que la capacité de transmettre des émotions par le langage.

L'AUTEUR



Nina JABLONSKI dirige le Département d'anthropologie à l'Université d'État de Pennsylvanie, aux États-Unis.

BIBLIOGRAPHIE

D. Lieberman et D. Bramble, *The evolution of marathon running : capabilities in humans*, *Sports Medicine*, vol. 37, pp. 288-290, 2007.

N. Jablonski, *Skin : a natural history*, University of California Press, 2006.

Chimpanzee sequencing and analysis consortium, *Initial sequence of the chimpanzee genome and comparison with the human genome*, *Nature*, vol. 437, pp. 69-87, 2005.

A. Rogers et al., *Genetic variation at the MC1R locus and the time since loss of human body hair*, *Current Anthropology*, vol. 45, pp. 105-108, 2004.

hypothèses tentent d'expliquer ce déséquilibre. Par exemple, l'une d'elles énonce que les femmes préfèrent les hommes avec une barbe plus fournie et des poils corporels plus épais, parce que ces traits sont associés à la virilité et à la force. Une autre propose que les hommes ont développé une préférence pour les femmes ayant des traits juvéniles.

Ces hypothèses sont intéressantes, mais personne ne les a vérifiées dans des populations humaines modernes ; on ignore, par exemple, si les hommes poilus sont plus vigoureux ou plus féconds que leurs homologues imberbes. En fait, on se demande encore pourquoi la pilosité humaine est aussi variée.

Vers un cerveau plus gros, sans surchauffe

L'absence de fourrure a eu des conséquences importantes sur les phases ultérieures de l'évolution humaine. La perte de la plupart des poils et la capacité de dissiper la chaleur corporelle par la transpiration eccrine ont facilité l'accroissement en volume de l'organe le plus sensible à la température, le cerveau.

Alors que les australopithèques avaient un cerveau d'une taille moyenne de 400 centimètres cubes (environ la taille du cerveau d'un chimpanzé), *H. ergaster* avait un cerveau deux fois plus gros. Et en un million d'années, le cerveau humain a gagné encore 400 centimètres cubes pour atteindre sa taille actuelle. Bien sûr, d'autres facteurs ont influé sur le déve-

loppement du cerveau, par exemple l'adoption d'une alimentation assez calorique pour nourrir cet organe gourmand en énergie. Mais la perte de la fourrure a certainement été une étape critique dans l'évolution du cerveau humain.

L'apparition d'une peau quasi glabre a aussi eu des répercussions sociales. Les poils corporels de l'homme peuvent se hérissier quand les petits muscles à la base des follicules pileux se contractent. Mais ses poils sont si fins que l'homme ne communique pas aussi bien que les chats, les chiens ou même les chimpanzés de cette façon. Il ne peut pas non plus paraître agressif ou se camoufler, comme le font le zèbre ou le léopard avec leur fourrure rayée ou tachetée.

En fait, on peut spéculer que des traits humains universels, par exemple le maquillage et les expressions faciales complexes, ont évolué après que l'homme a perdu la capacité de communiquer au moyen de sa fourrure (voir la figure ci-dessus). De même, la peinture corporelle, les cosmétiques, les tatouages et d'autres types de décoration de la peau existent dans toutes les cultures humaines, parce qu'ils véhiculent l'appartenance à un groupe, le statut et d'autres informations sociales importantes, autrefois encodés dans la fourrure.

L'homme utilise aussi des attitudes corporelles et des gestes pour communiquer ses émotions et ses intentions. Et il a un langage pour exprimer en détail ses pensées. Vue de cette façon, la peau nue n'a pas seulement rafraîchi l'homme, elle l'a aussi rendu humain.

Des livres à offrir ou à s'offrir



À contre-idées • Didier Nordon

Trouver du comique dans une idée sérieuse (et inversement), du local dans une idée générale (et inversement), de l'absurde dans une idée sensée (et inversement), de l'esprit littéraire au sein des sciences (et inversement). Au fil de ses billets d'humeur, Didier Nordon s'ingénie à bousculer les idées reçues et tout ce qui semble évident et... qui ne l'est pas. Un livre décapant, pour jouer avec les mots... et les idées.

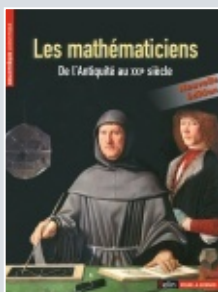
224 pages • 19 euros • 075110



Au nom de l'infini • Jean-Michel Kantor, Loren Graham

Peut-on parler de mathématiques, de religion, de politique dans un même ouvrage ? Oui, et c'est le défi qu'ont relevé le mathématicien Jean-Michel Kantor et l'historien des sciences Loren Graham, du MIT. Ce livre touchera même ceux que les mathématiques laissent indifférents, voire effraient. Les auteurs éclairent les liens étroits entre la vie – avec ses plaisirs et ses drames – et l'œuvre de ces hommes et ces femmes qui ont marqué le XX^e siècle par leur créativité en mathématiques.

288 pages • 24 euros • 075107



Les mathématiciens • Collectif

Autant artistes que scientifiques, les mathématiciens sont en proie à leurs passions, leurs interrogations, leurs doutes, leurs tourments, leurs angoisses, et la hantise de la beauté. « Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kowalevskaia. Les mathématiciens doivent faire preuve de rigueur et de ténacité, mais surtout d'inventivité. Maudissant chaque jour leur impuissance à faire reculer les frontières du savoir, ils s'émerveillent pourtant, regardant derrière eux, de l'ampleur du chemin parcouru.

280 pages • 24 euros • 075109



La physique buissonnière • Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique et curieux de sciences, les auteurs vous invitent à une promenade sur ces chemins de traverse. Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer. Suivez-les pour découvrir et comprendre cette physique du quotidien.

160 pages • 22 euros • 075105

Les lasers à polaritons

Les physiciens développent des lasers d'un nouveau type, fonctionnant à très faible énergie. Ces dispositifs sont fondés sur les polaritons, des états particuliers créés à partir d'électrons et de lumière.

Guillaume Malpuech et Dmitry Solnyshkov

Les interactions au sein d'un solide sont complexes. Les décrire complètement est impossible, mais le concept de quasi-particule s'est révélé très utile. Les physiciens nomment ainsi une interaction se propageant au sein d'un solide, dont les effets équivalent pour l'essentiel à ceux de la propagation d'une particule fictive dotée d'une masse et d'une charge électrique.

Les «trous» d'électrons sont un exemple bien connu de quasi-particule : ils représentent les interactions du réseau atomique d'un solide avec le flux de ses électrons mobiles quand il manque une charge électrique élémentaire (celle d'un électron). Quasi-particule chargée positivement, le «trou» d'électron a son pendant négatif : l'«électron». Cette dénomination est abusive, car elle désigne en fait l'interaction du réseau atomique avec le flux d'électrons mobiles quand il s'y trouve un excès de une charge élémentaire.

Quand ils veulent décrire efficacement des interactions plus complexes, les physiciens du solide combinent les quasi-par-

ticules. Nous verrons ainsi que l'on peut combiner une paire électron-trou et un photon. Nommées polaritons, les quasi-particules en question sont l'objet d'intenses recherches dont nous allons évoquer les principaux aspects, le plus notable étant sans doute la naissance d'un nouveau principe de laser.

Des combinaisons photon-exciton

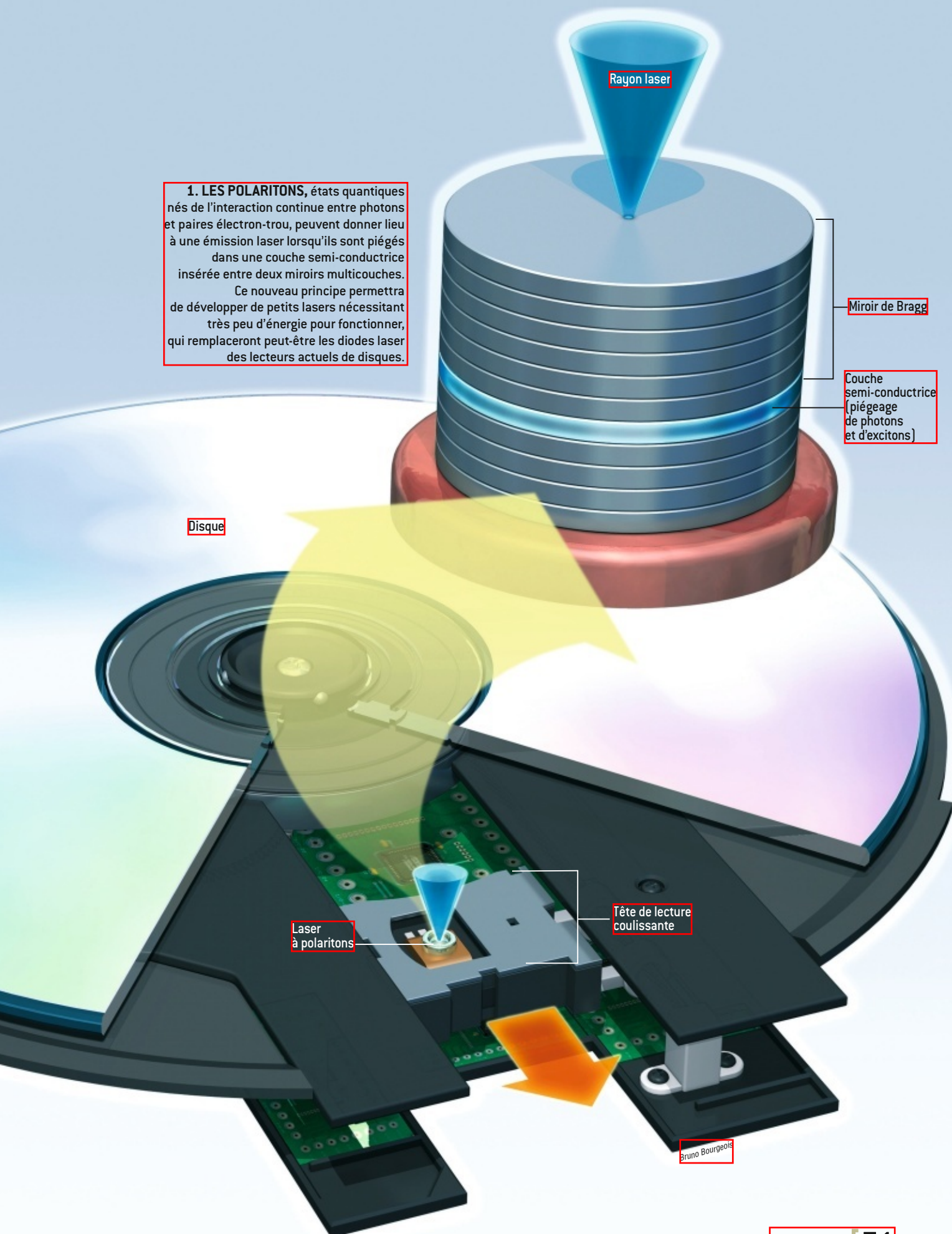
Comment obtient-on des polaritons ? En superposant un piège à excitons à un piège à photons. Pour comprendre ce que cela signifie, il nous faut commencer par spécifier la nature des deux composantes du polariton, l'exciton et le photon.

La lumière, rappelons-le, est de nature quantique : elle se manifeste à la fois comme une onde électromagnétique et comme un grain d'énergie, c'est-à-dire un photon. Les physiciens évoquent le photon chaque fois qu'ils discutent des interactions entre la lumière et des particules

L'ESSENTIEL

- ✓ Les excitons sont des « quasi-particules » qui représentent des états liés électron-trou au sein d'un semi-conducteur.
- ✓ En forçant les excitons à interagir fortement avec la lumière au sein de pièges spécifiques, on obtient des polaritons, qui sont des quasi-particules.
- ✓ La condensation de Bose-Einstein de ces quasi-particules est possible à température ambiante et s'accompagne d'un rayonnement laser.

1. LES POLARITONS, états quantiques nés de l'interaction continue entre photons et paires électron-trou, peuvent donner lieu à une émission laser lorsqu'ils sont piégés dans une couche semi-conductrice insérée entre deux miroirs multicouches. Ce nouveau principe permettra de développer de petits lasers nécessitant très peu d'énergie pour fonctionner, qui remplaceront peut-être les diodes laser des lecteurs actuels de disques.



Bruno Bourgeois

LA DISPERSION AU SEIN DES PIÈGES

Le comportement des quasi-particules dans leurs pièges dépend de leur « relation de dispersion ». La notion de dispersion est d'origine optique : elle désigne le fait que les différentes couleurs qui composent la lumière se propagent à des vitesses différentes dans un matériau. De même, puisqu'à toute (quasi) particule quantique est associée une onde intrinsèque (dite de Broglie), cette particule se propage dans un matériau à une vitesse qui dépend de la fréquence ou de la longueur d'onde de son onde intrinsèque, puisque $\lambda = h/mv$, où λ est la longueur d'onde, m la masse, v sa vitesse et h est la constante de Planck.

Plutôt que la vitesse, les physiciens emploient le « nombre d'onde » k , qui lui est proportionnel : $k = mv/h$, où $h = h/(2\pi)$. La relation de dispersion lie l'énergie E de la particule à son nombre d'onde k .

En physique du solide, la relation de dispersion des électrons et des trous est compliquée, car elle dépend de ce que l'on appelle la structure de bandes. Mais lorsque k est proche de 0, elle devient presque

parabolique, c'est-à-dire de la forme : $E = \hbar^2 k^2 / 2m_{\text{eff}}$.

Or cette formule est celle de l'énergie cinétique d'une particule dans le vide. Ainsi, un électron peu mobile dans un solide se comporte à peu près comme une (quasi) particule dans le vide dotée d'une masse effective m_{eff} , dont la valeur traduit l'intensité de ses interactions avec le réseau cristallin. De même, un exciton peu mobile dans un solide se comporte comme une (quasi) particule dotée d'une certaine masse effective.

Les excitons qui nous intéressent sont dans un réseau cristallin qui les piège seulement dans la direction z . Dans un tel puits quantique, les énergies que peut avoir une quasi-particule sont quantifiées, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent prendre que certaines valeurs précises : les niveaux d'énergie. Même si son énergie dans la direction z est fixe, un exciton reste libre dans le plan perpendiculaire à z (celui du piège), où il satisfait une relation de dispersion du type $E = \hbar^2 k_{\parallel}^2 / 2m_{\text{eff}}$. Dans cette formule, $k_{\parallel}$ est le nombre d'onde dans le plan

du piège et m_{eff} une masse effective qui dépend de la structure du piège, mais qui est de l'ordre de la masse de l'électron.

Pour les photons aussi, une cavité optique planaire est l'équivalent d'un puits quantique dans la direction z , et eux aussi s'y trouvent sur des niveaux d'énergie étagés et sont dotés d'une masse effective. Une fois de plus, la relation entre l'énergie d'un photon confiné et son nombre d'onde dans le plan n'est plus donnée par une relation du type $E = \hbar k$ comme dans le vide, mais de type $E = \hbar^2 k_{\parallel}^2 / 2m_{\text{eff}}$. La masse effective du photon est typiquement inférieure de cinq ordres de grandeur à celle de l'exciton.

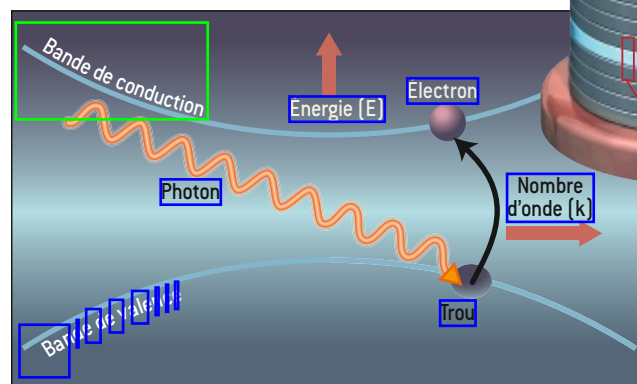
Notons enfin que pour les polaritons, qui mélangent exciton et photon, la relation de dispersion prend une forme très différente, avec un minimum très marqué en $k = 0$.

de matière, par exemple des électrons. L'électron se comporte lui aussi à la fois comme une particule et comme une onde. Au sein des conducteurs et des semi-conducteurs, l'ensemble des électrons périphériques des atomes constitue une sorte d'onde électronique globale baignant tout le volume du matériau, que l'on appelle la « mer électronique ». C'est au sein de cette onde électronique que se propagent des excès ou des déficits d'une charge élémentaire, c'est-à-dire les « électrons » et les « trous » évoqués plus haut.

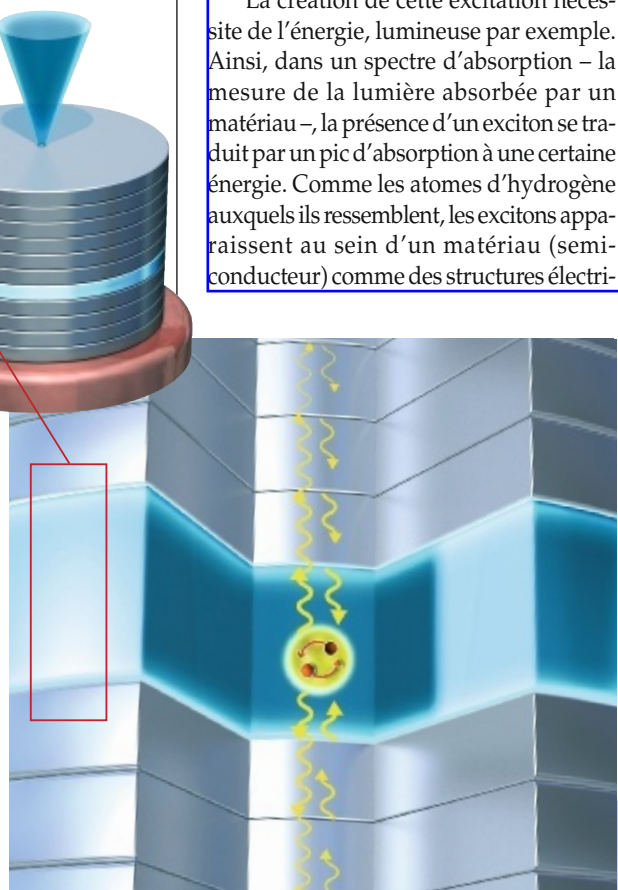
Un photon et une paire électron-trou piégés dans la même région

Tels l'électron et le proton de l'atome d'hydrogène, un électron (au sens de la physique du solide) et un trou peuvent se lier pour former au sein d'un matériau semi-conducteur une paire électron-trou, nommée aussi exciton. Pourquoi ce terme ? Parce que les excitons représentent une excitation par rapport à la situation où le réseau ne comporte ni électron libre ni trou.

La création de cette excitation nécessite de l'énergie, lumineuse par exemple. Ainsi, dans un spectre d'absorption – la mesure de la lumière absorbée par un matériau –, la présence d'un exciton se traduit par un pic d'absorption à une certaine énergie. Comme les atomes d'hydrogène auxquels ils ressemblent, les excitons apparaissent au sein d'un matériau (semi-conducteur) comme des structures électri-



L'arrivée d'un photon d'énergie appropriée fait passer l'un des électrons de la bande de valence à la bande de conduction (les deux dernières bandes d'énergies permises dans un semi-conducteur), où l'électron laisse un « trou ». L'« électron » et le « trou » ainsi créés se comportent comme des quasi-particules. Un exciton naît quand l'attraction électrostatique lie ces deux quasi-particules. Si leur nombre d'onde k (ou la vitesse) est peu élevé, toutes ces quasi-particules se retrouvent sur des niveaux d'énergie paraboliques (ci-dessus). L'interaction permanente d'un exciton avec le photon qu'il émet en s'annihilant, puis réabsorbe en se reformant, constitue un polariton (à droite).



quement neutres caractérisées par un rayon et une masse particuliers.

Nous pouvons maintenant concevoir qu'en piégeant un photon et un exciton dans une même région, on crée entre eux une interaction permanente représentée par une quasi-particule, le polariton (voir l'encadré page ci-contre). Pour l'obtenir, il faut trouver le moyen de placer un ou plusieurs « puits quantiques », jouant le rôle de pièges à excitons, au sein d'une « cavité optique » faisant office de piège à photons.

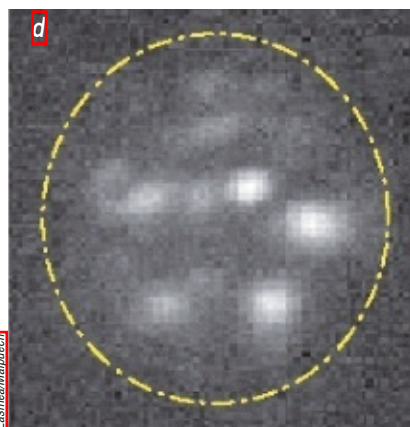
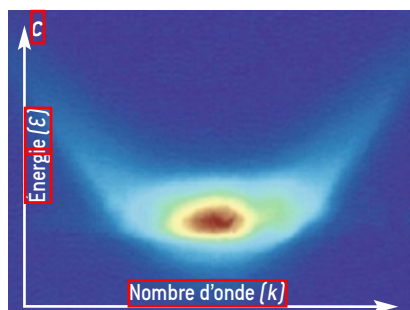
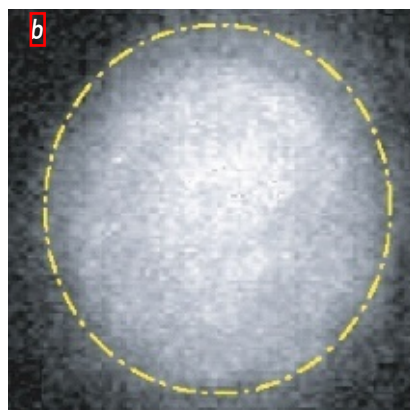
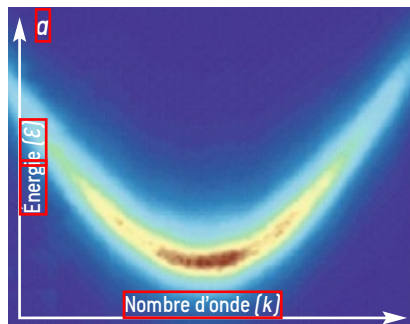
Cette cavité optique consiste en deux miroirs de Bragg se faisant face. Un miroir de Bragg est une succession de couches planes et transparentes d'indices de réfraction différents. Une telle structure réfléchit presque toute la lumière incidente, pour une longueur d'onde appropriée. Les déphasages entre les ondes réfléchies à chaque interface dépendent en effet de la longueur d'onde lumineuse et de la distance entre plans, et ces déphasages doivent donner lieu à une interférence constructive. Un miroir de Bragg est donc construit pour fonctionner pour une longueur d'onde précise : l'épaisseur de ses couches successives doit être égale à un quart de la longueur d'onde de fonctionnement.

Entre les deux miroirs de Bragg qui se font face, on intercale une couche d'épaisseur égale à un multiple de la demi-longueur d'onde. Un photon introduit dans cette couche y crée un mode photonique confiné : en d'autres termes, une répartition stationnaire du champ lumineux dans le plan du piège optique.

Au sein de ce piège à photons, on place un ou plusieurs puits quantiques aux maxima du champ électrique du mode photonique confiné. Concrètement, les puits quantiques prennent la forme de couches de matériau semi-conducteur épaisses de quelques nanomètres seulement.

En pratique, ces pièges sont obtenus par croissance cristalline en de nombreuses étapes, grâce aux progrès techniques accomplis dans les années 1980. Le piégeage des excitons et des photons se fait le long de l'axe de la croissance du cristal, noté z . Les excitons et les photons restent donc libres de se déplacer dans le plan perpendiculaire à z , qui est aussi celui du piège.

Comment caractériser le comportement de ces particules ou quasi-particules dans le piège ? Cette information est donnée par la « relation de dispersion »



2. L'ÉMISSION LUMINEUSE d'un gaz de polaritons dans l'espace $[\epsilon, k]$ et dans l'espace physique avant et après la condensation de Bose-Einstein traduit la relation de dispersion des excitons. Avant la condensation (a et b), l'émission est diffuse. Après la condensation (c et d), l'émission devient cohérente et tend à se concentrer autour d'une seule valeur de k dans l'espace $[\epsilon, k]$ et à devenir ponctuelle (plusieurs condensats sont présents simultanément) dans l'espace physique.

dans le matériau, c'est-à-dire par la relation entre leur énergie et leur vitesse.

Comment créer des excitons dans le puits quantique ? En y pompant de l'énergie lumineuse, c'est-à-dire en l'inondant de lumière. Une partie de cette lumière y est absorbée et crée des excitons. Une telle paire électron-trou peut se recombiner (l'électron et le trou disparaissent simultanément) et restituer sous la forme d'un photon l'énergie ayant servi à le créer. À peine émis, le photon se retrouve dans le piège optique, dans la même région de l'espace que le piège à excitons.

L'interaction d'un exciton et d'un photon piégés ensemble peut se produire de deux façons, l'une qualifiée de faible et l'autre de forte. Dans la première, un photon émis par la recombinaison d'un exciton quitte la cavité avant d'interagir à nouveau avec un exciton ; on parle de régime de couplage faible, puisque le photon ne reste pas assez longtemps dans la cavité pour que de nouvelles interactions aient lieu.

Piégeage dans un plan

Dans le régime de couplage fort, en revanche, l'exciton émet en se recombinant un photon dont la durée de vie est assez longue pour que le photon soit réabsorbé et recrée l'exciton ; ce dernier réémet ensuite le photon, puis le réabsorbe, etc. C'est ainsi que s'établissent des états intermédiaires entre exciton et photon : les polaritons. Dans le piège, ces états quantiques mêlant lumière (le photon) et matière (l'exciton) ne sont confinés que dans la direction z ; ils s'étendent dans tout le plan du piège, perpendiculaire à z .

Il existe en fait plusieurs sortes de polaritons, mettant en jeu des quasi-particules différentes. Ceux que nous considérons ici sont nommés polaritons de microcavité, par référence à la microcavité optique. L'énergie des polaritons de microcavité résultant du couplage fort peut prendre deux valeurs, l'une basse et l'autre élevée, mais toutes deux différentes de celles du photon et de l'exciton d'origine.

L'écart entre ces deux énergies est de l'ordre de cinq à dix milliélectronvolts (un électronvolt vaut $1,6 \times 10^{-19}$ joule) dans les structures à base d'arséniure de gallium (GaAs, l'un des semi-conducteurs les plus utilisés en optoélectronique) ; il peut atteindre 60 milliélectronvolts dans des structures réalisées avec

LES AUTEURS



Guillaume MALPUECH est chercheur du CNRS au LASMEA (Laboratoire des sciences et matériaux pour l'électronique et d'automatique, unité mixte CNRS/Université Blaise Pascal), à Clermont-Ferrand. **Dmitry SOLNYSHKOV** est maître de conférences à l'Université Blaise Pascal et travaille au LASMEA. Il a été le lauréat du Grand prix Jeune chercheur de la ville de Clermont-Ferrand en 2008.

BIBLIOGRAPHIE

J. Levrat *et al.*, Condensation phase diagram of cavity polaritons in GaN-based microcavities: Experiment and theory, *Phys. Rev. B*, vol. 81, 125305, 2010.

A. Kavokin *et al.*, *Microcavities*, Oxford University Press, 2007.

G. Malpuech *et al.*, Bose glass and superfluid phases of cavity polaritons, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, 206402, 2007.

J. Kasprzak *et al.*, Bose-Einstein condensation of exciton polaritons, *Nature*, vol. 443, pp. 409-414, 2006.

M. Richard *et al.*, Experimental evidence for nonequilibrium Bose condensation of exciton Polaritons, *Phys. Rev. B*, vol. 72, pp. 201-301, 2005.

A. Kavokin et G. Malpuech, *Cavity polaritons*, Elsevier, 2003.

C. Weisbuch *et al.*, Observation of a coupled exciton-photon mode splitting in a semiconductor quantum microcavity, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 69, p. 3314, 1992.

du nitrure de gallium (autre semi-conducteur). Cette différence entre les énergies des deux états de polariton est un paramètre important, car elle détermine la vitesse d'échange de l'énergie entre le mode photonique et le mode excitonique. Par exemple, un écart de 10 milliélectronvolts signifie qu'un exciton émet un photon, puis le réabsorbe en 0,2 picoseconde (une picoseconde est égale à 10^{-12} seconde). Même s'ils sont assez stables pour être exploités, les polaritons finissent par disparaître: leur durée de vie, de l'ordre de la picoseconde, est liée pour l'essentiel à celle, brève, de la composante photonique.

À ce stade, il importe d'insister sur ce qui étonne les physiciens avec les polaritons. Pour commencer, les polaritons sont des systèmes physiques peu ordinaires, puisqu'il s'agit de quasi-particules composées d'une quasi-particule matérielle (l'exciton) et d'une particule de lumière (le photon). Mais, surtout, ils ont une masse effective environ 100 000 fois inférieure à celle d'un électron dans le vide, donc environ 100 millions de fois plus petite que celles des atomes constituant le réseau cristallin... Une masse effective aussi faible est inédite et ne peut que conférer aux polaritons des comportements singuliers.

Condensation de Bose-Einstein

L'émission laser obtenue avec des polaritons illustre justement cela de façon fascinante. Cette émission ne résulte en effet pas du principe classique d'émission laser (l'inversion de populations d'atomes excités et non excités), mais de la formation d'un « condensat de Bose-Einstein ». Expliquons ce que cela veut dire.

Il existe deux types distincts, par leurs propriétés quantiques, de particules: les bosons et les fermions. Les fermions, de spin demi-entier, ne peuvent pas se trouver dans le même état quantique qu'un autre fermion identique. Les bosons, dont le spin est entier, ne sont pas soumis à cette interdiction: des bosons identiques peuvent se retrouver tous dans l'état de plus basse énergie possible du système considéré (par exemple un puits de potentiel). On nomme « condensation de Bose-Einstein » le processus où les bosons perdent assez de leur énergie pour se retrouver tous dans l'état de plus basse

énergie, dit état fondamental. La condensation de Bose-Einstein n'est possible à une température donnée que si la densité de particules dépasse une valeur critique, au-delà de laquelle les bosons s'accumulent dans l'état fondamental. La possibilité d'une telle condensation fut décrite dès 1924 par Albert Einstein sur la base de la notion de boson introduite par le physicien indien Satyendranath Bose (1894-1974). Mais elle n'a été observée pour la première fois qu'en 1995, dans un gaz ultrafroid d'atomes bosoniques (atomes de spin entier).

Plusieurs phénomènes où des bosons se retrouvent tous dans le même état sont apparentés à la condensation de Bose-Einstein. Citons l'émission d'un rayonnement laser, les photons (des bosons) émis ayant tous à peu près la même énergie et la même direction; il en est de même de la supraconductivité, qui trouve son origine dans la formation de paires bosoniques d'électrons, et de la superfluidité des gaz suffisamment froids d'atomes bosoniques. Sauf dans le cas des photons (dont la masse est nulle), tous ces effets, ainsi que la condensation de Bose-Einstein, ne s'observent qu'au-dessous d'une certaine température, d'autant plus basse que les bosons concernés ont une masse élevée (la température de condensation est inversement proportionnelle à la masse).

Dans le cas des polaritons, la température critique de condensation de Bose-Einstein est très élevée, puisque ces quasi-particules sont des bosons de très faible masse. La condensation des polaritons n'est limitée que par l'instabilité des polaritons – plus la température est élevée, plus les polaritons sont instables – et par la nécessité d'avoir une densité suffisante de polaritons.

Franchir ces obstacles est difficile tant l'obtention du régime de couplage fort est contraignante. Il faut travailler dans une gamme de températures où les excitons sont stables, ce qui, dans le cas des semi-conducteurs en arséniure de gallium couramment utilisés, signifie au-dessous de 50 à 80 kelvins (-223 à -193 °C). Dans les semi-conducteurs tels que le nitrure de gallium ou l'oxyde de zinc, où les excitons sont bien plus stables, on peut *a priori* observer à température ambiante la condensation de Bose des polaritons, voire construire un composant qui exploite ce phénomène.

On est loin d'avoir tout compris des lasers à polaritons. Normalement, la formation dans un fluide quantique d'un condensat de Bose-Einstein s'accompagne de la superfluidité, c'est-à-dire de la capacité à s'écouler sans frottements. Or ce ne semble pas être le cas avec les condensats de polaritons. Pourquoi ?

Une contrepartie importante de la faible masse effective des polaritons est que leur durée de vie est faible dans leur état fondamental : de l'ordre de la picoseconde (10^{-12} seconde). Ce temps de vie bref a longtemps suggéré aux chercheurs que la condensation de Bose des polaritons ne pourrait pas être observée, car il s'agit en principe d'une transition de phase thermodynamique, décrite pour des particules ayant un temps de vie infini. Toutefois, avec les lasers à polaritons, on se trouve dans le cas particulier de systèmes où des particules sont continuellement injectées dans le piège par un pompage extérieur, tandis que d'autres le quittent à cause de leur durée de vie finie. Il s'agit donc d'un système en quasi-équilibre, et non pas à l'équilibre. Or d'un point de vue théorique, seule la condensation de Bose dans un système à l'équilibre a été étudiée en détail et... assez bien comprise. Une théorie efficace de la condensation de Bose dans un système ouvert manque encore.

Du point de vue expérimental, depuis 1997, de nombreux résultats ont été obtenus. Une étape importante a été franchie en 2005-2006 grâce aux travaux de l'équipe de Le Si Dang, à Grenoble, en collaboration avec l'École polytechnique fédérale de Lausanne et notre laboratoire (le LASMEA). En particulier, le changement radical de l'émission lumineuse obtenue, une fois franchi le seuil de condensation, a été observé (voir la figure 2).

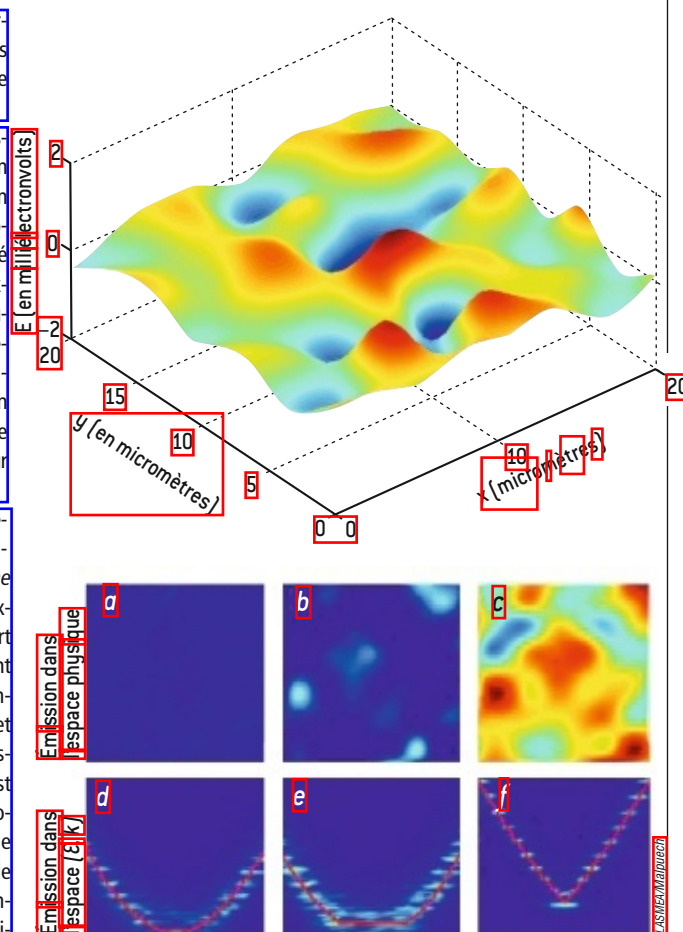
La condensation de Bose des polaritons a ensuite été observée par plusieurs autres équipes dans des microcavités à base de divers semi-conducteurs. Pour autant, un condensat de Bose-Einstein est en

principe superfluide, mais la superfluidité du condensat de polaritons n'a pas été clairement observée, ce qui intrigue les physiciens.

On montre que pour faire disparaître les frottements dans un condensat, il faut que la relation de dispersion cesse d'être parabolique pour devenir linéaire. Suggéré par Lev Landau en 1941 pour expliquer les propriétés de l'hélium superfluide, ce changement de la relation de dispersion traduit la minimisation de l'énergie d'interaction des particules du condensat entre elles au point de rendre possible leur propagation sans frottement.

Cette dispersion linéaire n'a cependant pas été observée expérimentalement (voir la figure b où une dispersion plate est visible). Pour expliquer cette déviation par rapport au cas idéal, deux hypothèses sont avancées. Selon l'équipe de Cambridge dirigée par P. Littlewood et celle de Trento dirigée par I. Carusotto, l'absence de superfluidité est liée à la durée de vie finie des polaritons, aspect qui est en effet une entorse à la théorie habituelle de la superfluidité. Mais nous ne sommes pas convaincus par cette explication, tant les modèles de la condensation de Bose dans les systèmes ouverts utilisés aujourd'hui paraissent arbitraires.

Nous proposons plutôt d'expliquer l'absence de superfluidité par l'inévitable désordre régnant au sein de la structure. La simple observation de l'émission laser au-dessous et au-dessus du seuil de condensation (voir la figure 2) révèle que le condensat n'est pas homogène dans l'espace, mais fragmenté. Pour exploiter cette idée, nous avons modélisé l'évolution dans le temps et l'espace du condensat dans un potentiel désordonné (ci-dessus en haut) imitant par son désordre les propriétés de la microcavité. Ces travaux montrent qu'à faible densité, l'émission est homogène dans l'espace et la dispersion parabolique (ci-dessus, a et d). C'est la phase « normale ». Pour les densités intermédiaires, lorsque la condensa-



LE POTENTIEL ALÉATOIRE qui caractérise une microcavité de tellure de cadmium (CdTe) est représenté en haut. Ci-dessus, les émissions lumineuses d'une telle cavité à mesure qu'augmente la densité de polaritons, au début faible (a et d), quand on a un verre d'Anderson (b et e) et quand les condensats se rejoignent et forment une phase superfluide à forte émission lumineuse (c et f, simulation).

tion débute, les polaritons remplissent les minima du potentiel désordonné et forment des lacs séparés les uns des autres. La relation de dispersion devient plate autour de $k = 0$ (ci-dessus, b et e). Une telle phase, cohérente, localisée et non superfluide est nommée verre d'Anderson. Nous pensons que c'est elle qui a été observée expérimentalement. Ensuite, lorsqu'on monte en densité, le niveau des lacs de condensat augmente à cause des interactions répulsives entre les particules. À un certain stade, les lacs se rejoignent pour former une mer, et le condensat devient superfluide (ci-dessus, c et f). On peut ainsi distinguer trois

phases différentes : la phase normale, le verre d'Anderson et la phase superfluide. D'après nos simulations, la phase superfluide se situe dans une gamme de températures et de densités accessible expérimentalement.

Nos conclusions ont été par la suite soutenues par l'observation en 2008, par une équipe de l'Université Stanford, de la dispersion linéaire caractéristique d'un superfluide dans une cavité réalisée à partir du semi-conducteur AsGa, de bien meilleure qualité que TeCd. D'autres travaux publiés en 2009 et 2010 rapportent des observations compatibles avec la formation d'un superfluide.

VERS DES CIRCUITS À POLARITONS ?

Le laser à polaritons n'est que le premier d'un ensemble de composants fondés sur les propriétés des polaritons. L'enjeu est la réalisation de circuits à polaritons qui ouvriraient la voie à un traitement de l'information ultra-rapide et entièrement optique.

Ce genre de composant nécessite toutefois la propagation et la manipulation de condensats sur plusieurs dizaines de micromètres.

Jusqu'à présent, le désordre présent dans les échantillons à microcavités et la trop brève durée de vie des polaritons ont limité les réalisations expérimentales, alors que de nombreux schémas de transistors ou d'interféromètres à polaritons ont été proposés.

Ces difficultés semblent en grande partie résolues par des travaux récents du Laboratoire de photonique et de nanostructures (CNRS,

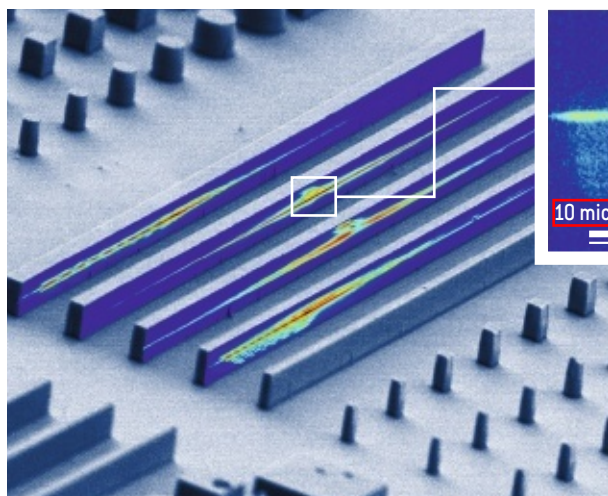
à Marcoussis) qui ont élaboré des microcavités en forme de fil (*ci-dessous*) où la durée de vie des polaritons est dix fois plus longue que dans les structures qui existaient jusqu'à présent. Elle peut de fait atteindre 100 picosecondes.

Ces travaux ont conduit, en collaboration avec notre laboratoire (LASMEA) et l'Institut des nanosciences de Paris (CNRS/UPMC), à la création de condensats de po-

laritons qui s'étendent bien au-delà de la zone où ils ont été créés, tout en gardant leur cohérence spatiale. Ces condensats lumière-matière interagissent avec leur environnement, ce qui a permis aux chercheurs de les manipuler par des moyens optiques.

Pour les obtenir, on emploie un faisceau laser pour créer localement des paires électron-trou. Une fois ces dernières en nombre suffisant, elles se condensent dans un même état quantique. Alors que jusqu'à présent, ce phénomène restait localisé à la zone d'excitation, les chercheurs ont pu observer la présence de cet état quantique macroscopique sur toute la longueur du fil.

Les physiciens ont en outre montré que l'expansion du condensat est gouvernée par le potentiel répulsif qui s'exerce entre le condensat et les particules non condensées dans la zone d'excitation. L'utilisation de ce potentiel fournit d'ailleurs un moyen nouveau de contrôler l'étendue du condensat.



CES FILS PHOTONIQUES (*à gauche*) dans lesquels sont créés des condensats de polaritons sont observés en microscopie électronique à balayage. Les émissions lumineuses des condensats dans l'espace (*ci-dessus*) ont été superposées sur la tranche des fils pour montrer d'où elles proviennent.

En effet, les polaritons de cavité sont en partie constitués de photons qui peuvent être émis vers l'extérieur de la cavité à travers les miroirs de Bragg, qui ont une certaine capacité à transmettre de la lumière. Comme les polaritons condensés sont très nombreux à être dans le même état quantique, c'est aussi le cas pour les photons émis hors de la cavité à travers les miroirs de Bragg. En d'autres termes, la condensation de Bose-Einstein des polaritons s'accompagne d'un rayonnement monochromatique, cohérent et intense, bref d'un rayonnement laser. Pour les physiciens, il est remarquable que ce rayonnement laser ne doive rien au principe de l'inversion de population qu'exploitent les autres lasers...

Le principe des lasers à polaritons a été proposé en 1996 par Atac Imamoglu de l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETH). Leur intérêt, potentiellement immense, tient au fait que l'énergie minimale à leur apporter pour les faire fonctionner est extrêmement faible, par comparaison avec tous les autres lasers.

Ces avancées suggèrent qu'il est temps de tenter d'exploiter les lasers à polaritons sous la forme d'une nouvelle génération de composants optoélectroniques très peu gourmands en énergie.

L'ensemble des effets physiques évoqués et leurs applications potentielles pourraient être obtenus à température ambiante si des microcavités étaient réalisées à partir de semi-conducteurs dits « à grande bande interdite » en nitrure de gallium (NGa) ou en oxyde de zinc (ZnO). Toutefois, cela représente encore un défi technique.

Des condensats à température ambiante

La réalisation de microcavités en nitrure de gallium fonctionnant en régime de couplage fort a déjà fait l'objet de trois projets européens en huit ans. C'est ainsi que l'observation du régime de couplage fort à 300 kelvins (la température ambiante) dans une structure en nitrure de gallium a été rapportée dès 2003. La qualité des structures a été par la suite fortement améliorée, de sorte

que le premier rayonnement d'un laser à polaritons fonctionnant à température ambiante a été obtenu en 2007. L'observation de la condensation de Bose-Einstein à cette température est revendiquée par des chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, des Universités de Southampton et de Cambridge, ainsi que par ceux de notre laboratoire.

Une étape reste à franchir avant d'obtenir des composants viables commercialement : la mise en circuit de ces structures. Notre laboratoire a déposé un brevet proposant un schéma d'injection efficace et développé en collaboration avec l'Université de Rome un simulateur du laser à polaritons pompé électriquement, simulateur qui inclut le transport des porteurs de charge électrique à partir des contacts, la formation des excitons et des polaritons, et la condensation de ces quasi-particules. Nos résultats suggèrent que des lasers à polaritons, fonctionnant avec beaucoup moins d'énergie que les photodiodes actuelles, arriveront sur le marché dans un futur proche. ■

La sélection SCIENCE

Spécial évolution



La Terre avant les dinosaures

Sébastien Steyer,
illustré par Alain Bénateau

Ce livre répare une injustice ! Il braque l'objectif sur de grands oubliés de la paléontologie : des vertébrés à quatre pattes qui, bien avant le règne des dinosaures, peuplaient notre planète. Retrouvez-les dans cet ouvrage, avec plus de 100 reconstitutions d'animaux pour beaucoup inédites, ainsi que de nombreuses photos de fossiles. Un livre événement pour tous les passionnés des mondes perdus !

978-2-7011-4206-7 • 208 p. • 25,00 €



Guide critique de l'évolution

Sous la direction
de Guillaume Lecointre

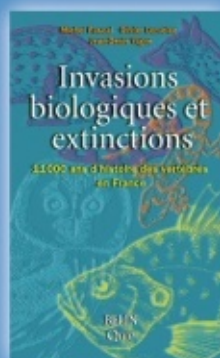
Pourquoi la théorie de l'évolution est-elle si souvent mal comprise du public ? Pourquoi fait-elle l'objet de si nombreuses attaques ? Ces questions sont au cœur de cet ouvrage. Il ne critique pas la théorie contemporaine de l'évolution, mais la façon dont nous en parlons. Il présente le cadre scientifique, épistémologique et historique dans lequel on peut comprendre l'évolution, et donne les clés pour déjouer les pièges que notre langage et nos réflexes premiers nous tendent.

978-2-7011-4797-0 • 576 p. • 35,00 €

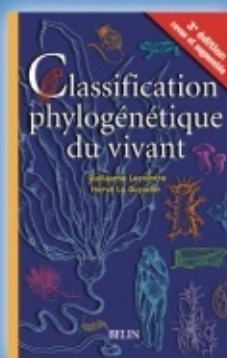


Feuilletez les premières pages de notre sélection de livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.pourlascience.fr



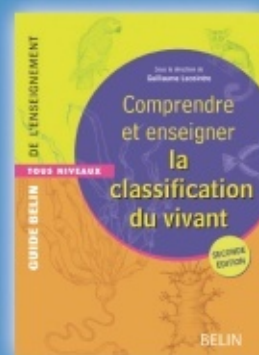
M. Pascal, O. Lorvelec et J.-D. Vigne
978-2-7011-3628-8 • 352 p. • 35,50 €



G. Lecointre et H. Le Guyader
978-2-7011-4273-9 • 560 p. • 41,50 €



A. Meinesz
978-2-7011-4694-2 • 336 p. • 19,50 €



G. Lecointre
978-2-7011-4799-4 • 360 p. • 27,00 €



M. Gargaud, H. Martin, P. López-García,
T. Montmerle, R. Pascal
978-2-7011-4799-4 • 304 p. • 26,50 €



C. Bousquet
978-2-7011-5119-9 • 160 p. • 6,95 €



P. Tassy
978-2-7011-4971-4 • 168 p. • 18,00 €



P. Forterre
978-2-7011-4425-2 • 256 p. • 20,50 €

Prix littéraire
de culture scientifique

HISTOIRE DES SCIENCES

Comment la France adopta l'heure de Greenwich

Il y a 100 ans, après presque 30 ans de résistance, la France abandonnait l'heure de Paris pour se mettre à celle de Greenwich... sans pour autant l'indiquer explicitement dans le texte de loi.

Jacques GAPAILLARD

Janvier 1911. Essoufflé, l'homme jette un coup d'œil à l'horloge de la gare de Lyon, à Paris, avant de s'engouffrer dans le bâtiment. Ouf, il n'est que 8h05

« heure de Paris ». Le train Paris-Lyon doit partir à 8h04 « heure du chemin de fer », et il lui reste donc encore quatre minutes pour rejoindre le quai et monter à bord. Tel était le quotidien du voyageur français à l'aube du XX^e siècle. Depuis le milieu du siècle précédent, les horaires des trains avaient cinq minutes de retard sur l'heure de Paris. On voulait à la fois aider le voyageur à prendre son train, et prévenir d'éventuelles réclamations en cas de train manqué. Cette spécificité française était accompagnée d'une autre particularité : l'heure de Paris, qui était l'heure légale française depuis 1891, avançait de 9 minutes et 21 secondes par rapport à l'heure de Greenwich et, de ce fait, ne s'intégrait pas au système des fuseaux horaires largement adopté dans le monde depuis 1892.

La France a finalement adhéré au système horaire mondial par la loi du 9 mars 1911, en même temps qu'elle se débarrassait de l'heure du chemin de fer. Pourquoi avoir si longtemps différé cette mesure ? Et quel événement a débloqué la situation ?

Pour comprendre la position française, remontons quelque temps plus tôt. Pendant longtemps, l'heure solaire vraie, celle des cadrans solaires, a été la seule envisageable, et son emploi allait de soi, sans qu'il fût nécessaire de le spécifier. Avec les progrès de l'horlogerie au XVIII^e siècle, on a peu à peu substitué à l'heure solaire vraie l'heure locale de temps moyen, heure fondée sur la course d'un soleil moyen fictif corrigée des irrégularités de la

LOI portant modification de l'heure légale française, pour la mettre en concordance avec le système universel des fuseaux horaires.

Le Sénat et la Chambre des députés ont adopté,
Le Président de la République promulgué la loi dont la teneur suit :

Article unique. — L'heure légale en France et en Algérie est l'heure, temps moyen de Paris, retardée de neuf minutes vingt et une secondes.

La présente loi, délibérée et adoptée par le Sénat et par la Chambre des députés, sera exécutée comme loi de l'Etat.

Fait à Paris, le 9 mars 1911.

A. FALLIÈRES.

Par le Président de la République :
Le ministre des travaux publics,
des postes et des télégraphes,
CHARLES DUMONT.

Le sous-secrétaire d'Etat des postes et des télégraphes,

Sur la proposition du directeur de l'exploitation télégraphique,

Arrête :

Art. 1^{er}. — A partir de la nuit du 10 au 11 mars 1911, à minuit, l'heure de tous les bureaux de poste, télégraphe et téléphone est celle du temps moyen de Paris, retardée de neuf minutes et vingt et une secondes.

Art. 2. — Pendant la période s'étendant de la nuit du 10 mars au 11 mars (minuit) à la nuit du 30 juin au 1^{er} juillet 1911 (minuit), l'indication de l'heure transmise aux navires en mer, par les stations côtières radiotélégraphiques ouvertes au service public, sera suivie de la mention : « Heure de l'Europe occidentale ».

Art. 3. — Le présent arrêté sera déposé au cabinet du sous-secrétariat d'Etat des postes et des télégraphes pour être notifié à qui de droit.

Fait à Paris, le 9 mars 1911.

(CHARLES CHAUMET).

1. LE TEXTE DE LA LOI du 9 mars 1911 sur l'heure légale française tel qu'il fut publié dans le *Journal Officiel*. Il indique que la nouvelle heure légale en France et en Algérie est l'heure de Paris retardée de 9 minutes et 21 secondes, sans pour autant spécifier que cette opération revient à adopter l'heure de Greenwich.

marque apparente du Soleil réel. Cette décision a d'abord été prise par la ville de Paris en 1826 (et non 1816 comme on le lit souvent), puis s'est étendue en province, mais le changement résultait uniquement d'initiatives locales.

Une heure de référence internationale

Cependant, le fonctionnement du chemin de fer ne pouvait s'accommoder des heures locales. Une même heure devait régler la marche des trains sur une même ligne et, bientôt, une heure unique, celle de Paris, a régné sur l'ensemble du réseau. C'est ainsi que le chemin de fer a diffusé en province l'heure de Paris, laquelle réglait, aux côtés de l'heure locale (et de l'heure du chemin de fer, décalée, nous l'avons vu, de cinq minutes par rapport à celle de Paris), la vie des villes desservies. À partir de la fin des années 1870, plusieurs villes ont pris l'initiative d'adopter l'heure de Paris, si bien qu'au début des années 1880, le paysage horaire français est un curieux mélange de l'heure de Paris, de l'heure du chemin de fer et des heures locales, mélange où il est difficile de se retrouver.

La France n'est pas le seul pays à avoir des problèmes d'horaires. Avec l'étendue du territoire des États-Unis en longitude et la multiplicité des compagnies ferroviaires, le paysage horaire des chemins de fer américains est particulièrement chaotique. En avril 1883 est présenté un projet de normalisation des heures ferroviaires aux États-Unis et au Canada, inspiré des idées de Sandford Fleming (1827-1915), ingénieur

canadien d'origine écossaise qui promeut la mise en place de fuseaux horaires. Ce projet prévoit de répartir ces heures selon cinq zones centrées sur les méridiens situés à 60°, 75°, 90°, 105° et 120° à l'Ouest de Greenwich, lesquels déterminent l'heure unique à l'intérieur de leur zone. Britannique, Fleming a tout naturellement proposé, comme méridien de référence dans son système, le méridien de Greenwich – méridien de référence de la marine anglo-saxonne. Les États-Unis et le Canada n'y voient pas d'objection et, réunie à Chicago le 11 octobre 1883, la *Convention générale de l'heure* décide que le nouveau système sera mis en place dès le 18 novembre suivant. Au-delà des chemins de fer, c'est toute la vie civile américaine qui va s'en trouver affectée.

Quelques mois plus tôt, en août 1882, les États-Unis ont aussi décidé d'organiser à Washington une *Conférence internationale du méridien* « afin de fixer un méridien propre à être utilisé comme zéro commun aux longitudes et comme base d'une normalisation de l'heure sur l'ensemble du globe ». Depuis plusieurs décennies, la question du choix d'un unique « premier méridien », ou méridien de référence, préoccupait les géographes, mais aucun accord ne se dessinait. L'initiative américaine avait le mérite de s'attaquer sérieusement au problème. La proposition américaine reçoit un écho favorable et la date de la conférence de Washington est arrêtée au mois d'octobre 1884.

En octobre 1883, soit quatre jours après la Convention de Chicago, s'ouvre à Rome une *Conférence de l'Association géodésique internationale* où est abordé le sujet qui sera débattu à Washington un an plus tard, mais la France ne prend pas l'affaire au sérieux. De plus, d'obscur transactions franco-anglaises sur un échange possible entre le méridien de Greenwich et le système métrique – les Britanniques auraient accepté de passer au système métrique en échange du choix du méridien de Greenwich – sèment le trouble dans les esprits. Aussi la délégation française censée soutenir le méridien de Paris à Rome n'a-t-elle pas une position très claire. Si bien qu'à l'issue de la conférence, l'ensemble des résolutions relatives à la conférence de Washington,



2. COMME TOUTES LES GARES DE FRANCE EN 1900, la gare de Saint-Césaire, petit village du Gard, indiquait sur sa façade l'heure de Paris, et sur le quai l'heure du chemin de fer, en retard de cinq minutes sur celle de Paris. Depuis 1891, l'heure de Paris était l'heure légale française, mais auparavant, les villes de province avaient chacune, outre ces deux heures, leur propre heure locale déterminée par la course du Soleil dans le ciel.

notamment le choix du méridien de Greenwich, est approuvé par les Français dans un vote final où seul s'abstient Maurice Lœwy, le directeur de l'Observatoire de Paris (le système métrique, lui, ne sera légalisé en Grande-Bretagne qu'en 1897. Quant à son adoption dans la vie courante...).

Échec du méridien neutre

La Convention de Chicago a mis en place une réforme horaire bien réelle, calée sur le méridien de Greenwich, et l'on devine que les Américains ne sont pas disposés à accepter le choix d'un autre méridien pour normaliser les longitudes et l'heure à l'échelle mondiale. Pourtant, les Français ne s'en inquiètent guère. Ils veulent surtout éviter de reproduire à Washington l'épisode peu glorieux de Rome, en donnant des instructions précises à la délégation française qui s'y rendra. À cet effet, une Commission de l'unification des longitudes et des heures se réunit en août 1884 ; elle recommande de n'adhérer au choix d'un méridien de référence qu'« à la condition qu'il aura un caractère réel d'internationalité », c'est-à-dire de neutralité. Bien que techniquement peu avantageuse, cette option du méridien neutre,

qui ne serait rattaché à aucun observatoire national, est séduisante dans son principe, et la France se donne le beau rôle en défendant une position parée de la noblesse du désintéressement et de l'universalité, dans l'esprit qui animait les révolutionnaires lorsqu'ils établirent le système métrique. Mais c'est aussi le moyen de s'opposer au méridien de Greenwich sans exposer celui de Paris dans un combat perdu d'avance.

La conférence de Washington dure tout le mois d'octobre 1884. La délégation française est dirigée par l'astronome Jules Janssen, directeur de l'Observatoire de Meudon. Conformément aux instructions qu'il a reçues et auxquelles il adhère pleinement, c'est à la surprise générale que Janssen déclare ne pas être venu pour défendre la candidature du méridien de Paris. Il développe alors une longue argumentation en faveur d'un méridien neutre qui pourrait passer par les Açores ou le détroit de Behring. La thèse de Janssen rencontre une forte opposition et le méridien de Greenwich est adopté par 21 voix contre une – celle de Saint-Domingue –, et deux abstentions – du Brésil et de la France. Le souhait d'un choix dicté par des considérations humanistes était impuissant devant la domination écrasante de la cartographie marine anglo-saxonne. En France, on restera discret

sur le fait que le méridien de Paris n'a pas été défendu à Washington, préférant laisser croire qu'il y a été vaincu par celui de Greenwich.

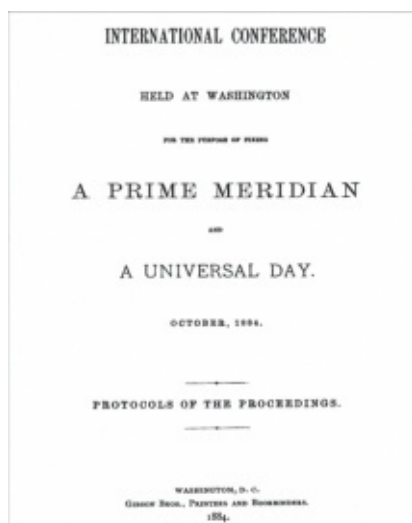
Lorsque la conférence passe à l'examen de la question horaire, Fleming ne manque pas de présenter son système, mais on lui objecte que la question des heures locales sort du champ de compétence de la conférence. Le système des fuseaux horaires ne sera donc pas voté à Washington, mais progressivement mis en place par la suite, de façon assez naturelle, surtout à partir de 1892. Au terme de la conférence de Washington, le jour civil de Greenwich est érigé en jour universel, compté de 0 à 24 heures, et à usage purement scientifique ou administratif.

Les décisions de la conférence doivent encore être approuvées par les gouvernements des différentes nations. Aussi, de retour de Washington, Janssen soutient que le méridien de Greenwich n'a pas encore gagné la partie. La France s'enferme alors dans un isolement horaire en Europe, et la loi du 14 mars 1891, qui abolit les heures locales en la dotant d'une heure nationale – l'heure de Paris –, lui permet d'affirmer encore davantage son indépendance. C'est aussi la première fois qu'un texte officiel dit ce qu'est l'heure légale en France.

Une astuce due à Louis Boudenoot

Au fil des années, l'isolement de la France devient de plus en plus absurde. Le 27 octobre 1896, le député Gabriel Deville dépose un projet de loi visant à mettre fin à cette situation. Son texte va droit au but : « Article premier. – Le méridien initial officiellement en usage en France est le méridien de Greenwich. Art. 2. – L'heure légale en France est l'heure du temps moyen de Greenwich. [...] ». Mais alors que l'opposition au méridien anglais est toujours vive, un texte qui ménage si peu les susceptibilités nationales n'a aucune chance d'aboutir et il est écarté par la commission parlementaire chargée de l'étudier. Les partisans de la réforme ne désarment pas et un nouveau projet de loi est déposé le 8 mars 1897 par le député Louis Boudenoot : « Article unique. – L'heure légale en France et en Algérie est l'heure,

temps moyen de Paris, retardée de 9 minutes 21 secondes. ». Comme ces 9 minutes 21 secondes correspondent à un angle de $2^{\circ} 20' 15''$, à peu près égal à l'écart en longitude entre Paris et Greenwich, ce texte dit la même chose que le précédent, mais il semble épargner le méridien de Paris et évite adroitement de mentionner Greenwich, ce qui change tout. Au point que le projet Boudenoot est voté sans discussion par les



3. LE COMPTE RENDU de la Conférence internationale du méridien qui se tint en octobre 1884 à Washington. Le méridien de Greenwich y fut adopté comme méridien de référence mondial à l'unanimité moins une voix et deux abstentions – dont celle de la France.

députés, le 24 février 1898. L'Académie des sciences refuse d'entrer dans le débat. Reste à obtenir l'approbation du Sénat.

Certains pensent que la France franchira le pas à l'occasion de l'Exposition universelle de 1900, mais la crise de Fachoda, un incident diplomatique qui oppose la France et le Royaume-Uni en 1898 au Soudan, puis l'impopulaire guerre des Boers en Afrique du Sud, entre les Britanniques et les descendants des premiers colons, soulèvent des vagues d'anglophobie, et leurs espoirs sont déçus. De plus, le 6 février 1899, les députés contredisent leur action précédente en émettant un vote positif sur un projet de loi irréaliste qui prévoit la décimalisation des heures et un système de fuseaux horaires calé sur « un

premier méridien qui devra passer dans la région de Behring », le tout à mettre en place pour le 1^{er} janvier suivant !

Cette incartade parlementaire n'a pas de suite, et le climat politique change radicalement avec les accords franco-britanniques de l'Entente cordiale, signés le 8 avril 1904. Mais le temps passe et le Sénat ne se prononce toujours pas sur le projet Boudenoot. Et pour cause : les ministères de l'Instruction publique et de la Marine y sont opposés et, dans ces conditions, la commission sénatoriale chargée de la question refuse de remettre son rapport. C'est là que... la tour Eiffel intervient.

La tour Eiffel joue un rôle décisif

Érigée pour l'Exposition universelle de 1889, la tour Eiffel avait provoqué les protestations indignées de nombreuses personnalités du monde littéraire et artistique, et devait être détruite après 1909. Aussi l'ingénieur Gustave Eiffel avait-il vu, dans les expériences prometteuses de télégraphie sans fil qui se multipliaient à cette époque, une occasion providentielle de préserver son œuvre. La tour constituait en effet un formidable pylône qu'il s'imposait d'exploiter. Déjà, le 5 novembre 1898, l'industriel Eugène Ducretet avait réalisé avec succès une transmission sur quatre kilomètres entre la tour Eiffel et le Panthéon, une première en milieu urbain. En décembre 1903, Eiffel mettait sa tour à la disposition du Génie militaire en prenant les frais d'installation à sa charge. Dès le mois suivant, sous la direction du capitaine Gustave Ferrié, les expériences commençaient avec une antenne à un fil, puis à quatre fils, chacun de 380 mètres. Les émissions atteignirent bientôt les côtes de l'Algérie, et leur portée dépassa 3 000 kilomètres la nuit.

Le 1^{er} janvier 1910, la concession de l'exploitation de la tour est renouvelée à Gustave Eiffel pour 70 ans, et l'« odieuse colonne de tôle boulonnée » est sauvée. Elle servira à la transmission non seulement des dépêches militaires, mais aussi de l'heure, dont l'intérêt est capital pour la détermination des longitudes. À l'époque, les marins

évaluent la longitude de leur position en comparant leur heure locale à celle d'un méridien de référence [Greenwich, ou Paris pour les Français], qu'un garde-temps embarqué – une montre – est censé indiquer : à raison de 15 degrés pour une heure, leur différence correspond à l'angle entre le méridien de leur position et celui de référence. Reçus à bord quasi instantanément, les signaux horaires permettront de corriger les indications du garde-temps au cours de la navigation, ce qui était impossible auparavant. Le 22 juin 1910, une nouvelle installation, avec des locaux souterrains et une antenne à six fils de 450 mètres chacun, est inaugurée par le Bureau des longitudes et son président Henri Poincaré. La première émission officielle de signaux horaires a eu lieu le 23 mai précédent.

Dès ce moment, Paris peut prétendre à un rôle international de premier plan dans le domaine de l'heure. Encore faut-il que la France consente, sans plus tarder, à entrer dans le système horaire mondial. Même si cet argument, de l'ordre du pari, ne peut être produit à l'appui de la réforme, il est clair que les performances de la station radiotélégraphique de la tour Eiffel sont l'élément déclencheur d'une décision qui, de toute façon, ne peut être encore longtemps différée.

Le 20 juillet 1910, le ministre Gaston Doumergue adresse au président de la commission sénatoriale concernée une lettre qui met fin à un blocage de 12 ans : « Tous les départements ministériels se sont montrés favorables à la mesure projetée, et le gouvernement, qui vient d'en délibérer, a reconnu, sans aucune réserve, l'intérêt qu'il y avait, au point de vue des relations internationales, à adopter un système aujourd'hui admis par tous les pays de l'Europe en dehors de la France, du Portugal et de la Grèce. » Le ministre demande à la commission de déposer son rapport « dans le plus bref délai possible ».

Le géodésien Charles Allemand, nommé commissaire du gouvernement, défend le projet Boudenoit au Sénat le 26 janvier, puis le 10 février 1911. Entre-temps, une nouvelle rédaction a été proposée, qui vise à limiter l'emploi de l'heure de Greenwich aux chemins de fer, postes et télégraphes, celle

de Paris étant maintenue partout ailleurs. Allemand n'a aucun mal à faire repousser ce texte qui réintroduit une dualité d'heures et double le décalage horaire dans les gares. Le projet Boudenoit est adopté par le Sénat dans sa rédaction initiale, tandis que la loi est définitivement votée à la Chambre le 9 mars suivant et publiée le lendemain au *Journal officiel*. Son application est immédiate : dans la nuit du 10 au 11 mars 1911, le temps est suspendu à minuit pendant 9 minutes et 21 secondes, tandis qu'enfin disparaît l'heure du chemin de fer.

65 millièmes de seconde d'écart

Le libellé de la loi ne trompe personne, mais il a dû faire sourire outre-Manche. Déclarer explicitement que l'heure légale française est celle de Paris, tout en annonçant implicitement qu'il s'agit de celle de Greenwich, relève de l'exploit ! Certains ironisent à ce sujet, d'autres parlent d'abdication, mais l'opération est un succès total : une *Conférence internationale de l'heure*, réunie à l'Observatoire de Paris en octobre 1912, prévoit la création d'une *Commission internationale de l'heure* dont l'organe exécutif, le *Bureau international de l'heure*, siégera à Paris ; il y sera officiellement établi en 1919. Paris est aussi désignée comme futur *Centre horaire international*, et la station centrale de signaux horaires sera celle de la tour Eiffel.

Le 9 mars 1911, la France a donc rejoint le concert des nations... à ceci près que les 9 minutes 21 secondes ne correspondent pas exactement à l'écart en longitude entre les observatoires de Paris et de Greenwich. En réalité, il s'en faut de 65 millièmes de seconde que la France soit strictement rattachée au système horaire mondial. Cette anomalie ne sera corrigée que par le décret du 9 août 1978 qui abroge la loi de 1911 et légalise en France un nouveau temps international, le temps universel coordonné, fondé sur le temps atomique et connecté à la rotation de la Terre. Ironie du sort, ce temps est élaboré au Bureau international des poids et mesures, près de Paris... et le méridien historique de Greenwich n'intervient plus dans cette affaire.



4. L'INSTALLATION RADIO de la tour Eiffel en 1909. La transmission d'informations – notamment l'heure – pouvait atteindre 3 000 kilomètres, et plus de 4 500 kilomètres en 1910.

L'AUTEUR



Jacques GAPAILLARD est professeur émérite à l'Université de Nantes où il a enseigné les mathématiques et l'histoire de l'astronomie [Centre François Viète].

BIBLIOGRAPHIE

J. Gapaillard, *Une histoire de l'heure en France*, Vuibert, à paraître.

P. Galison, *L'empire du temps. Les horloges d'Einstein et les cartes de Poincaré*, Gallimard, 2007.

À ÉCOUTER

Jacques Gapaillard sera l'invité de l'émission *La marche des sciences* du jeudi 3 mars 2011, sur France Culture de 14h à 15h. <http://www.franceculture.com>

LOGIQUE & CALCUL

Mesurer les chercheurs

La folie évaluatrice dans le monde de la recherche scientifique a provoqué une multiplication des méthodes. L'indicateur de Hirsch est devenu le moyen le plus expéditif de noter un chercheur.

Jean-Paul DELAHAYE

Il est légitime et utile d'évaluer la qualité d'un chercheur. Mais comment le faire quand si peu de gens ont la compétence nécessaire ? Si l'on s'adresse à des spécialistes, on n'échappera pas à la subjectivité, aux querelles d'école, voire à la jalousie. L'évaluation humaine par les pairs restera essentielle, mais selon l'opinion qu'« un chiffre, même médiocre, vaut mieux que pas de chiffres du tout », on a voulu compléter et contrôler le jugement humain avec du concret et du mesurable.

Il est naturel de s'appuyer sur les écrits d'un chercheur pour le noter. Il existe aujourd'hui une multitude de bases bibliographiques qui recensent les articles, les congrès et les livres et permettent, en tenant compte d'une grande quantité de publications, de calculer le nombre N de travaux d'un chercheur.

Mais les homonymies, les erreurs de frappe, les obstacles typographiques créés par les lettres accentuées, les traits d'union et les abréviations des prénoms, la non-exhaustivité des bases bibliographiques, tout cela engendre des erreurs qui parfois fau-

sent gravement les résultats [voir plus loin l'exemple de Grigori Perelman]. Par ailleurs, certains journaux sont bien plus exigeants que d'autres, et il serait injuste de comptabiliser de la même façon un article dans une revue qui publie tout texte soumis et un autre dans une revue qui n'en retient qu'un sur 100.

Une solution consiste à classer les revues et publications en catégories et à pondérer les listes des écrits d'un chercheur en fonction de ce classement. Cette solution largement utilisée est mauvaise, car, si le classement des revues est fait par des comités réunis pour cela, on risque de constater la surévaluation des revues auxquelles participent les membres du comité et la pénalisation des revues associées aux écoles et sensibilités concurrentes mal représentées.

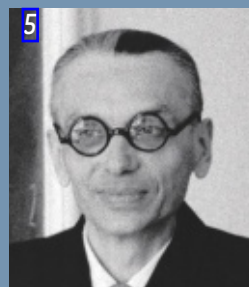
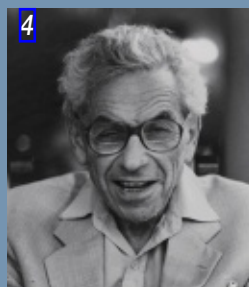
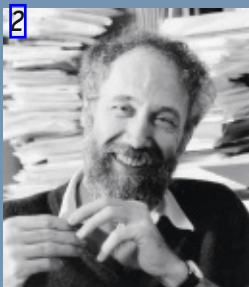
La solution du calcul de « facteurs d'impact » des revues ne semble guère meilleure, les méthodes proposées pour les définir étant médiocres, voire absurdes. Le facteur d'impact détermine la valeur d'une revue d'après le nombre de ses articles qui sont cités dans les deux années suivant

leur parution. Ce calcul fixe la valeur de la revue et donc le coefficient associé aux articles qu'elle publie.

Cette méthode est absurde : en mathématiques par exemple, plus de 90 pour cent des citations portent sur des articles publiés plus de deux ans auparavant. Une autre absurdité du facteur d'impact est qu'il est calculé en ne prenant en compte que certaines revues, déterminées subjectivement et en favorisant bien sûr les revues de langue anglaise : le facteur d'impact contient donc la composante subjective qu'il prétendait éviter.

Le contestable « facteur d'impact »

Autre problème dont les spécialistes de bibliométrie ont démontré la gravité : un article dans une « bonne revue » peut être moins bon, par exemple par le décompte des citations qu'on en fait, qu'un article paru dans une revue jugée moyenne ou médiocre. Il n'est donc pas satisfaisant de se fonder sur le classement des comités ou les fac-



teurs d'impact des revues pour juger la qualité des publications d'un chercheur. En 2007, la *European Association of Science Editors* (EASE) a d'ailleurs émis l'avis suivant : « Le facteur d'impact n'est pas toujours un instrument fiable. En conséquence, on ne doit l'utiliser – avec précaution – que pour comparer l'influence des revues, mais pas pour évaluer un article et encore moins un chercheur ou un programme de recherche. »

Une idée plus simple et sans doute bien plus saine est de prendre en compte le nombre total de citations (NTC) faites aux travaux du chercheur à évaluer. Si un chercheur est cité, c'est que ses travaux sont reconnus et appréciés. Plus un chercheur est cité, plus son NTC augmente, plus il devient clair qu'il est efficace, a de l'influence et produit des idées et résultats pertinents. Au moins en première approximation, il semble raisonnable de jauger un chercheur à partir de son NTC.

Calculer le NTC d'un chercheur exige de disposer de bases de données contenant les listes d'articles publiés mais aussi, pour chaque publication, la liste des publications qu'elle mentionne. De l'ensemble

de ces listes on déduit, grâce à des programmes informatiques, le nombre de citations renvoyant à une publication donnée. Les trois principales bases de données sont la propriété d'acteurs privés : *Thompson Reuters* dispose de la base *SCI (Science Citation Index)*, via le *Web of Science* ; *Elsevier* a lancé en 2004 la base *Scopus* ; *Google* propose *Google Scholar* dont l'accès, contrairement aux deux autres, est gratuit.

Compter les citations

Les deux premières incluent surtout des journaux de recherche rigoureusement sélectionnés et mesurent donc l'activité de recherche dans un sens étroit. La base *Google Scholar*, plus large, donnera une idée de l'activité du chercheur en prenant mieux en compte les actes de conférences et congrès (très importants en informatique), ainsi qu'une part du travail de publication didactique. Selon les domaines et selon ce qu'on souhaite mesurer, on choisira l'une ou l'autre, mais toutes les trois sont assez bonnes et donnent des évaluations rarement contradictoires.

Considérons quelques exemples calculés en utilisant la base *Google Scholar* et la page Internet qui en synthétise les résultats (<http://quadsearch.csd.auth.gr/index.php?lan=1&s=2>).

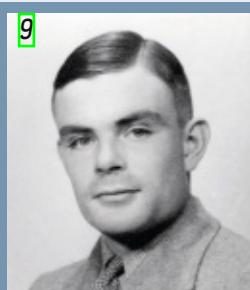
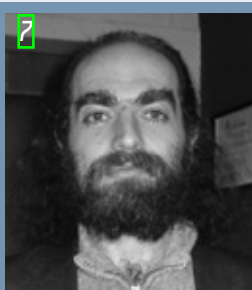
Nous trouvons que les travaux de Paul Erdős ont été cités 15 040 fois, chiffre considérable, mais peu étonnant puisqu'il est sans doute le plus prolifique de tous les mathématiciens du XX^e siècle avec plus de 1 500 articles à son actif (dont 975 sont identifiés par le système). Jean Dieudonné, un des piliers du groupe Bourbaki, a lui été cité 12 580 fois. L'influent Nicolas Bourbaki obtient 16 127. Alexandre Grothendieck, mathématicien français vénéré, a un NTC de 9 110 et Cédric Villani, l'un des médaillés Fields 2010, un NTC de 3 426. Notons que seuls les mathématiciens de bonne renommée atteignent un NTC de 1 000.

Quelques tests et l'examen de ces nombres montrent que le nombre total des citations NTC est une note imparfaite attribuée à un chercheur. D'abord, les problèmes typographiques sont difficiles à éliminer. Une requête pour « N Bourbaki » donne 25 642,

1. Le classement de quelques mathématiciens

Pour chacun de ces 11 mathématiciens renommés, on a noté le nombre N des publications repérées, le nombre total de citations (NTC) qu'elles ont reçu, l'indice h , l'indice g et le taux moyen de citations (TMC). Ces données brutes ont été calculées le 29 décembre 2010 à l'aide du site *Uad Search* (<http://quadsearch.csd.auth.gr/index.php?lan=1&s=2>) qui utilise la base bibliographique *Google Scholar*. Paul Erdős est le chercheur de notre liste qui a le plus publié, mais c'est lui qui a le taux moyen de citations par article le plus faible. Les deux plus célèbres mathématiciens de notre sélection sont sans doute Andrew Wiles et Grigori Perelman à cause de leur démonstration, pour l'un du grand théorème de Fermat, pour l'autre de la conjecture de Poincaré. Or ce sont les moins cités, ceux qui ont le moins de publications identifiées et les plus petits indices h et g !

	N	NTC	Indice h	Indice g	TMC
1. Nicolas Bourbaki	355	16127	47	125	45,4
2. Alain Connes	329	19892	61	138	59,4
3. Jean Dieudonné	310	12580	39	111	40,6
4. Paul Erdős	975	15040	60	110	15,4
5. Kurt Gödel	215	7471	28	85	34,6
6. A. Grothendieck	136	9110	32	95	66,9
7. Grisha Perelman	20	1643	11	20	82,1
8. Terence Tao	445	13387	49	107	30,1
9. Alan Turing	100	14359	22	100	143,6
10. Cédric Villani	102	3426	28	58	33,6
11. Andrew Wiles	88	3277	16	57	37,2



ce qui est presque le double de ce qu'on obtient avec la requête « Nicolas Bourbaki ». L'écart, qui n'est pas aussi grand pour les autres chercheurs, est sans doute dû au fait que les ouvrages de Bourbaki ne font pas apparaître complètement le prénom Nicolas.

Autre difficulté : une partie des citations comptabilisées pour Bourbaki devrait être reportée sur Jean Dieudonné, puisqu'il est l'un des auteurs anonymes des ouvrages de Bourbaki. Bien sûr, personne ne sait comment opérer ce report ! Le même problème se pose, cette fois à une bien plus grande échelle, pour l'encyclopédie Wiki-

pédia dont l'impact est devenu considérable... et impossible à prendre en compte.

Cédric Villani, le plus jeune des chercheurs mentionnés ici, est défavorisé puisque sa carrière est loin d'être terminée.

Par ailleurs, d'une discipline à l'autre, les usages en matière de publication et de citation sont très différents. Il est donc absurde de comparer des chercheurs de disciplines différentes en considérant leur NTC (voir la figure 3). En mathématiques, par exemple, on publie moins et les articles sont plus souvent publiés avec un seul nom d'auteur, alors qu'en physique des articles ayant plusieurs

dizaines de signataires ne sont pas rares. Ce problème des articles signés à plusieurs se retrouvera plus loin pour l'indice h .

En examinant, publication par publication, le nombre des citations faites à chacune, on remarque que, même chez les plus renommés des scientifiques, nombreux sont les articles à ne jamais être cités. Certes, il est faux de croire que les articles jamais cités sont inutiles, mais je doute que beaucoup de chercheurs sachent qu'une part importante de leurs travaux n'est jamais mentionnée, et cela même s'ils ont été publiés dans des revues prestigieuses.

2. Articles, citations, indice h

Considérons un chercheur ayant N publications $P_1, P_2, \dots, P_N$ à son actif. Notons C_i le nombre de fois que la publication P_i a été citée dans une autre publication. On supposera que l'on a classé les publications en plaçant les plus citées en tête : $C_1 \geq C_2 \geq C_3 \geq \dots \geq C_N$. Le nombre total NTC de citations de ce chercheur est : $C_1 + C_2 + \dots + C_N$. L'indice h de ce chercheur est par

définition le plus grand i tel que $i \leq C_i$. Géométriquement, l'indice h est donc l'abscisse du point le plus à droite du graphe de la fonction $i \rightarrow C_i$, placé au-dessus de la droite $y = x$, c'est-à-dire en gros l'abscisse de l'intersection de la droite avec la courbe (voir le graphique de gauche ci-dessous).

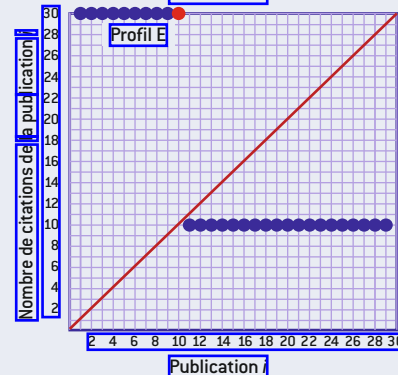
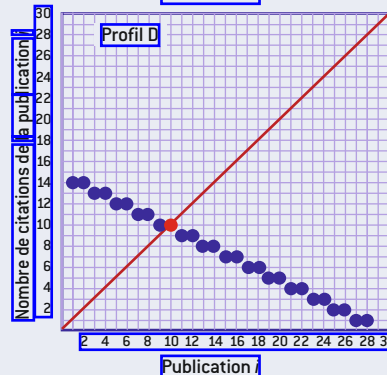
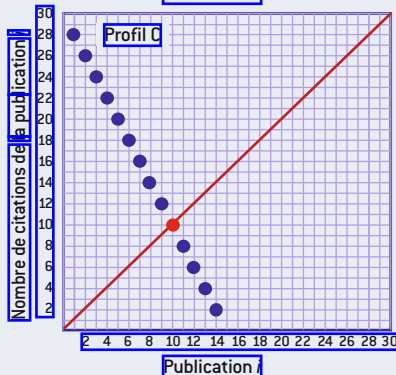
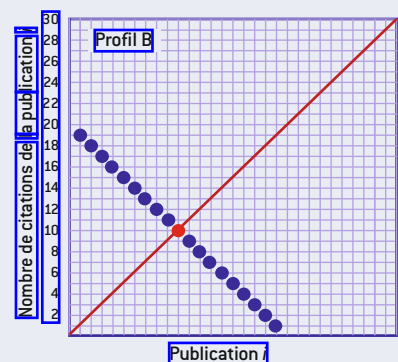
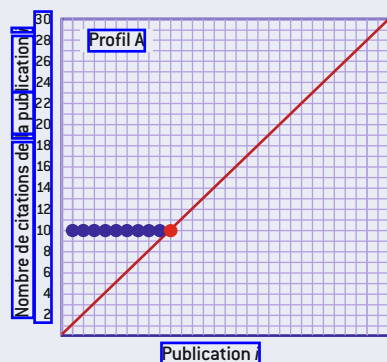
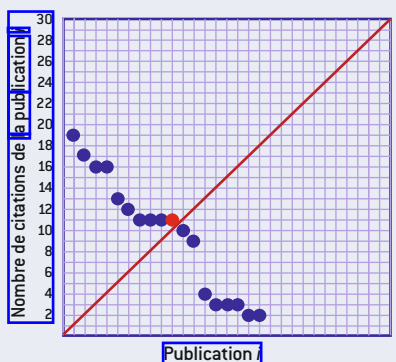
Avoir un indice h de 10 peut résulter de profils très différents (c'est

un reproche fait à l'indice h). Examinons cinq profils.

- Profil A. C'est le « chercheur optimal », il obtient 10 avec 10 articles cités chacun 10 fois. Nul ne peut avoir un indice h de 10 en étant moins cité.
- Profil B. C'est le « chercheur linéaire équilibré » : en moyenne, chacune de ses 19 publications est citée 10 fois et il a autant de citations inutiles (45) avant le point d'intersection de sa

courbe avec la droite $y = x$ qu'après. Son NTC est $1 + 2 + 3 + \dots + 19 = 190$. Comme on le voit ci-contre (modèle A), il peut espérer gagner un point d'indice h tous les deux ans.

- Profil C. Encore un « chercheur linéaire ». Cette fois, 90 des citations de ses neuf premières publications sont inutiles (à son indice h de 10) et 30 autres après le point d'intersection. Conseil : il doit éviter les



Le nombre total de citations NTC d'un chercheur est informatif, mais son domaine de variation est assez large et il a plusieurs défauts qui le rendent inapte à opérer des comparaisons fines. Un chercheur ayant publié un seul travail dans un domaine central ou à la mode et qui, du coup, est très visible et largement cité sera considéré comme l'égal d'un autre qui aura publié une série de travaux difficiles et plus spécialisés, donc moins cités, alors que la contribution scientifique réelle du second peut être très supérieure. Un chercheur publiant des articles de synthèse sera favorisé, même s'il est peu

créatif. Les auteurs de livres seront en général défavorisés car, d'une part, les livres sont moins bien pris en compte que les articles dans les bases de données et, d'autre part, le travail pour écrire un livre est en général bien plus grand que pour un article.

L'indice h de J. Hirsch

C'est sans doute pour cela qu'en 2005, Jorge Hirsch, physicien de l'Université de Californie à San Diego, a introduit une nouvelle idée qui, depuis, est devenue le critère préféré pour évaluer les chercheurs. L'idée de l'indice

de Hirsch a donné lieu à tant d'études et de travaux de bibliométrie qu'aujourd'hui la publication de J. Hirsch de 2005 est citée 1 252 fois alors que sa publication la plus citée en physique ne l'est que 410 fois... ce qui est pourtant très bien !

L'indice h (ou h -index en anglais) de Hirsch prend en considération uniquement les meilleures publications d'un chercheur. L'indice h d'un chercheur est le plus grand entier k tel que les k articles les plus cités de ce chercheur ont chacun été cités au moins k fois. Pour avoir un indice h de 1, il faut avoir 1 publication citée 1 fois. Pour avoir un indice h de 2,

publications trop citées (par exemple en les fractionnant).

- Profil D. À nouveau un « chercheur linéaire », mais ses publications après l'intersection sont les plus utiles et gagnent les citations (90 pertes après le point d'intersection, et 20 avant). Conseil : il doit se faire citer plus.
- Profil E. Ce chercheur est le plus « maladroit » de notre lot : 200 citations sont inutiles avant l'intersection,

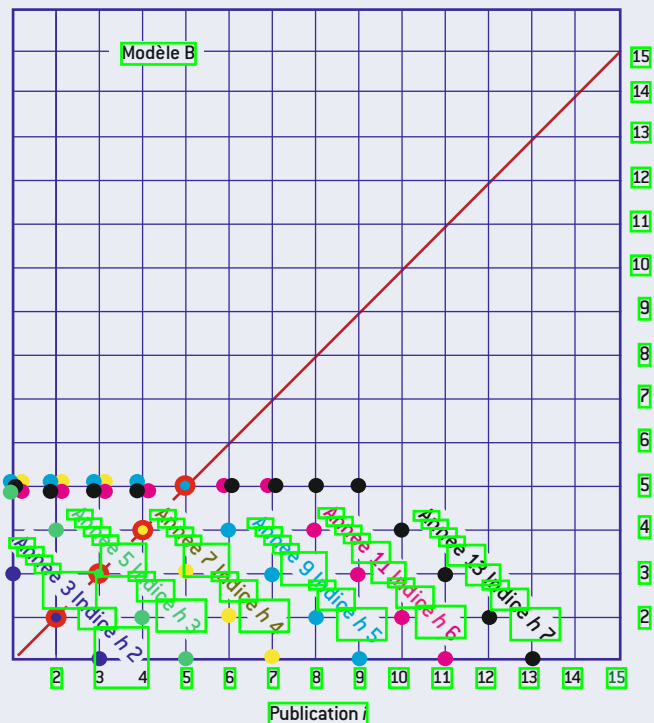
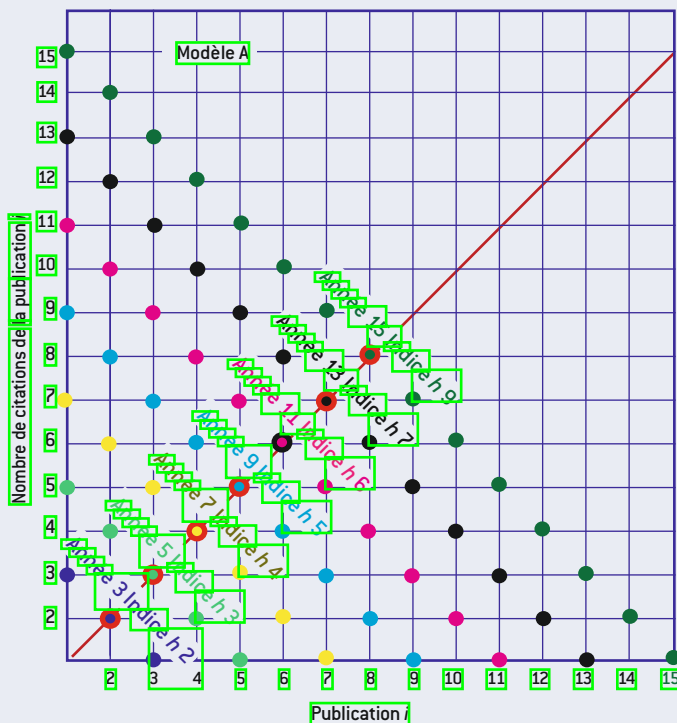
et 200 après. On imagine sans mal des cas pires encore.

Examinons maintenant l'évolution de l'indice h de chercheurs réguliers. Imaginons un chercheur (modèle A) qui publie un article chaque année et supposons que dès l'année où l'article a été publié, il est cité une fois par an exactement (y compris l'année de sa publication). Au bout d'un an, l'indice h

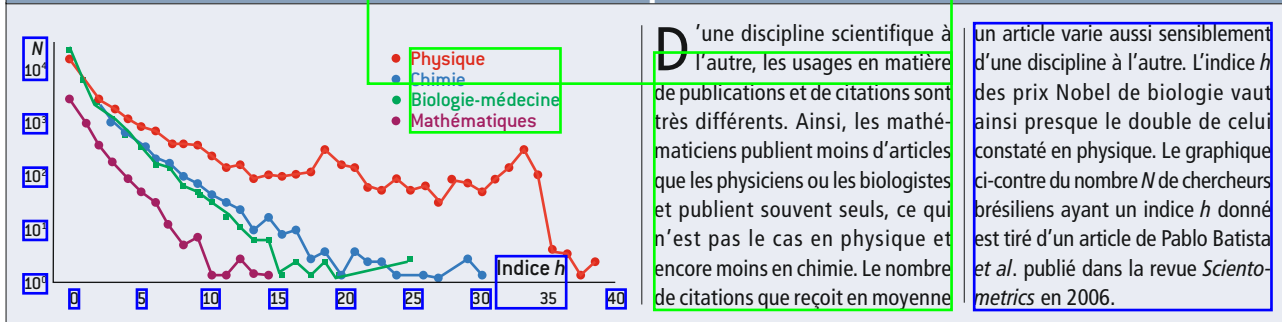
de notre chercheur imaginaire est 1 (il a un article cité une fois). Il lui faut attendre la fin de sa troisième année pour avoir un indice h de 2 et la fin de l'année $2k - 1$ pour avoir un indice h égal à k . L'indice h d'un tel chercheur croît linéairement.

L'hypothèse de citations régulières et indéfiniment prolongées pour chaque article publié est assez optimiste. En effet, les phénomènes de

mode et l'oubli ont pour conséquence qu'après avoir atteint un maximum, un article verra en général l'intérêt qu'il suscite diminuer. Si l'on suppose qu'au bout de cinq ans, on cesse de mentionner les articles de notre chercheur imaginaire (modèle B), cela aura un grave impact sur son indice h qui, après avoir atteint 5, cessera de croître, car aucun de ses articles ne sera jamais cité plus de cinq fois.



3. D'une discipline à l'autre



il faut avoir au moins 2 publications citées au moins 2 fois chacune, etc.

L'indice h est donc majoré par le nombre de publications du chercheur : si vous n'avez publié que 5 articles, votre indice h ne pourra pas dépasser 5. Par ailleurs, si vous publiez beaucoup, mais que vous n'êtes jamais cité, votre indice h sera nul. Autre conséquence (voulu par J. Hirsch) de la définition : si vous avez un très bon NTC, mais que cela n'est dû qu'à un seul article, votre indice h vaudra 1.

Plus on avance, plus il est difficile de faire croître son indice h . Le nombre minimal de citations qu'il faut pour atteindre un indice h de k est k^2 . En général, on constate que le NTC d'un chercheur est 3 à 5 fois le carré de son indice h . Ce facteur est bien supérieur à 5 dans le cas où les meilleurs travaux sont beaucoup cités, ce qui est souvent le cas chez les chercheurs exceptionnels. Pour doubler son indice h , il faut être cité 4 fois plus, et pour le multiplier par 10, il faut que la notoriété des travaux soit multipliée par 100. Cet indicateur composite prend en compte l'intensité du travail d'un chercheur et sa qualité.

Voici un petit tableau pour les cinq mathématiciens mentionnés plus haut :

	N	NTC	Indice h
P. Erdős	975	15 040	60
N. Bourbaki	355	16 127	47
J. Dieudonné	310	12 580	39
A. Grothendieck	136	9 110	32
C. Villani	102	3 426	28

En dépit d'opposants déterminés, l'indice h constitue, selon les spécialistes de bibliométrie, une mesure efficace et assez robuste, qui donne une idée grossière et instantanée de la productivité et de la qualité du travail d'un chercheur. Cependant :

– Il ne faut pas oublier qu'il dépend de la base bibliographique permettant son calcul.

– Il peut y avoir des erreurs dues en particulier aux homonymies et aux difficultés typographiques. Il faut contrôler au moins les k premières publications pour un indice h valant k ; cet examen est plus facile que pour le NTC, car l'indice h ne dépend que d'un petit nombre de publications.

– Il est absurde de comparer des chercheurs de disciplines différentes, car les usages concernant les publications et les citations varient d'un domaine à l'autre. Les facteurs correctifs qu'on a tenté de calculer restent peu sûrs.

– De nombreux biais favorisent ou défavorisent un chercheur. En particulier, on doit prendre en compte l'âge d'un chercheur et le fait qu'il publie seul ou pas.

– Un seul nombre ne peut pas et ne pourra jamais évaluer à la fois la créativité, la persévérance, le rayonnement, l'influence, l'aptitude à la synthèse d'un individu. En conséquence, tout ramener à une seule note ne donnera jamais d'évaluation fine de la personnalité et des accomplissements précis d'un chercheur. C'est essentiel à retenir pour un comité qui doit recruter, attribuer une promotion ou décider d'un financement.

Dans son article de 2005, J. Hirsch a proposé une série d'arguments en faveur de son invention. Selon lui, parce qu'il limite l'importance des *hits* (publications citées de très nombreuses fois), l'indice h donne un classement plus juste des chercheurs que le NTC qui par ailleurs possède un pouvoir discriminant illusoire. De même, il n'a pas le défaut du nombre N de publications (car un chercheur qui publie beau-

coup sans jamais être cité n'est probablement pas un bon chercheur).

L'indice h est un meilleur indicateur que le nombre d'articles cités au moins K fois, qui décompterait aussi les bons articles d'un chercheur, mais dépendrait d'un facteur arbitraire K . Ce n'est pas le cas de l'indice h .

L'indice h d'un chercheur ne peut qu'augmenter. Avec des hypothèses simples sur la productivité d'un chercheur et l'écho de son travail, on aboutit à un modèle théorique de chercheur ayant un indice h qui croît linéairement tout au long de sa carrière, ou alors qui croît jusqu'à un maximum que le chercheur ne dépasse plus (voir la figure 2).

Du pour et du contre

D'après J. Hirsch, l'indice h est peu sensible (du moins quand il n'est pas trop petit) au phénomène de l'autocitation et aux petites erreurs que contient nécessairement une base de données bibliographique.

En examinant par exemple une série de lauréats du prix Nobel de physique, J. Hirsch a constaté qu'ils possèdent tous un indice h supérieur à 20. D'autres tests ont confirmé dans d'autres disciplines que les personnalités les plus en vue ont tous de bons indices h (pour leur discipline).

J. Hirsch a aussi mené une étude statistique pour évaluer la capacité prédictive de l'indice h . Prenant en compte l'indice h au bout de 12 années de recherche d'une série de scientifiques, il a calculé la capacité de son indicateur à prévoir la qualité du travail dans les 12 années suivantes. Son étude semble concluante. Assez étrangement même, la corrélation entre les indices h au bout des

12 années et le NTC au bout de 24 ans est meilleure que la corrélation entre le NTC au bout de 12 ans et le NTC au bout de 24 ans : pour savoir si un chercheur sera bon (au sens du NTC) dans la suite de sa carrière, il vaut mieux se fier à son indice h actuel qu'à son NTC actuel ! Parmi les défauts de l'indice h , il y a son imprécision : c'est un entier, qui interdit de faire des comparaisons fines. Mais il est probable que les nombreuses méthodes qui tentent de donner des notes plus fines (non entières) créent une précision illusoire.

On lui reproche aussi d'être victime de l'effet Matthieu, ainsi nommé à cause de la phrase de l'Évangile selon saint Matthieu : « À celui qui a, il sera beaucoup donné et il vivra dans l'abondance, mais à celui qui n'a rien, il sera tout pris, même ce qu'il possédait. » Autrement dit, on citera une publication d'autant plus facilement qu'elle l'a déjà été beaucoup.

Le plus grave défaut de l'indice h est qu'il incite à découper en plusieurs petits articles ce qui aurait dû être un seul article et à renoncer à écrire des livres qui rapportent trop peu. Son utilisation encourage les pratiques de copinage : on citera largement ses amis et on les fera cosigner, pour peu qu'ils fassent de même. Enfin, son utilisation conduit à choisir des sujets faciles et à la mode qui assurent qu'on sera cité, voire suggère la publication d'articles provocants défendant des thèses auxquelles on ne croit pas soi-même, mais dont on est certain qu'elles feront réagir et donc qu'elles seront citées.

On peut ajouter un autre conseil encore : publiez un article avec une erreur et faites un correctif, vous aurez ainsi deux publications d'un coup : si l'article intervient dans votre indice h , il comptera double puisque ceux qui le citeront mentionneront aussi le correctif. N'oubliez pas non plus que lorsque vous vous citez, il faut choisir ceux de vos articles proches du seuil de votre indice h : ceux trop cités n'ont pas besoin de l'être plus, et ceux trop peu cités risquent fort de ne l'être jamais assez.

L'indice g est un peu compliqué, mais intéressant. C'est le plus grand entier g tel que les g articles les plus cités sont cités au moins g^2 fois au total. Cet indicateur, toujours supérieur ou égal à l'indice h , prend mieux

en compte les *hits* d'un chercheur. Notons un petit paradoxe autoréférent : J. Hirsch aurait mieux fait de définir cet indice g qui le favorise bien plus que l'indice h , puisque son article sur l'indice h est un *hit* dans sa liste de publications...

Oubliés et tricheurs

Pour insister sur la méfiance qu'on doit éprouver à l'égard de l'indice h , mentionnons deux cas extrêmes.

Grigori Perelman qui a démontré la conjecture de Poincaré est l'un des dix plus grands mathématiciens vivants ; pourtant son indice h , calculé avec la base *Google Scholar*, vaut 0. La raison est que celui qu'on nomme Grigori Perelman en Occident, et c'est sous ce seul nom qu'il est mentionné dans *Wikipédia*, est enregistré avec le prénom Grisha ! Notons que même avec le prénom corrigé, l'indice h de Perelman reste faible.

L'exemple de Ike Antkare est inverse. L'indice h de Ike Antkare vaut 95, ce qui en fait l'un des meilleurs chercheurs de tous les temps. Mais cet exploit n'est pas de nature scientifique : Ike Antkare n'existe pas ! Son indice h résulte d'une manipulation délibérée menée par Cyril Labbé, de l'Université de Grenoble. C. Labbé a créé 101 faux articles ayant Ike Antkare comme auteur. Cent de ces articles citaient tous les autres, et le 101^e citait des articles réels déjà référencés par *Google Scholar* pour faire croire que Ike Antkare était bien connecté au monde réel universitaire. C. Labbé a ensuite mis en ligne des pages Internet où ont été déposés ces 101 articles. *Google Scholar*, piégé, a pris en compte ces pages et ces articles... du moins presque tous. Ainsi, pour *Google Scholar*, Ike Antkare a publié 95 articles, chacun ayant été cité la même année au moins 95 fois, et il faut donc lui attribuer un indice h égal à 95.

Cet exploit illustre qu'il est facile de tricher et démontre à ceux qui utilisent l'indice h pour évaluer les chercheurs qu'ils doivent se méfier. Faire de la bonne recherche n'a jamais signifié publier une multitude de petits articles en y éparpillant ses idées pour accumuler des points, comme un automobiliste accumule les points d'une station-service pour gagner des verres à whisky.

L'AUTEUR



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

Rapport de l'Académie des sciences, *Du bon usage de la bibliométrie pour l'évaluation individuelle des chercheurs*, 17 janvier 2011 [disponible sur <http://www.academie-sciences.fr>]

N. De Bellis, *Bibliometrics and Citation Analysis : From the Science Citation Index to Cybermetrics*, The Scarecrow Press, 2009.

C. Labbé, *Ike Antkare, one of the great stars in the scientific firmament*, ISSI Newsletter, vol. 6(2), 2009 : <http://membres-lig.imag.fr/labbe/Publi/IkeAntkareSub.pdf>

G. Woeginger, *An axiomatic characterization of the Hirsch h -index*, *Mathematical Social Sciences*, vol. 56, pp. 224-232, 2008.

J. Hirsch, *Does the h -index have predictive power ?* *PNAS*, vol. 104/49, pp 19193-19198, 2007. [arxiv.org/abs/0708.0646].

A.-M. Kermarrec *et al.*, *Que mesurent les indicateurs bibliométriques ?*, Rapport INRIA, 2007 : www.inria.fr/content/download/6425/58287/version/1/.../ce_indicateurs.pdf

L. Egghe, *Theory and practice of the g -index*, *Scientometrics*, vol. 69(1), pp. 131-152, 2006.

J. Hirsch, *An index to quantify an individual's scientific research output*, *PNAS*, vol. 102/46, pp. 16 569-16 572, 2005. [arxiv.org/abs/physics/0508025].

ART & SCIENCE

L'homme descend du crocodile...

... ou comment une statue océanienne conduit à revisiter le darwinisme et les hypothèses de ceux qui s'y opposent.

Philippe CHARLIER

A la fin des années 1990, le marchand d'art David Godreuil parcourt la vallée du fleuve Sépik et sa région, au Nord de la Papouasie-Nouvelle-Guinée. Dans le village de Yenchan, il collecte une grande statue ancienne, encore couverte de quelques restes de peintures végétales et minérales (voir page ci-contre). L'individu figuré, d'une soixantaine de centimètres de hauteur, est un être mythique, un ancêtre du clan, dont la filiation avec le crocodile est visible sous la forme d'un long prolongement caudal en queue de saurien garni de renflements suggestifs. De fait, le crocodile est au cœur de nombreuses croyances de ces populations, une légende affirmant même que le paradis et les enfers correspondent chacun à une partie de la mâchoire entrouverte d'un de ces reptiles.

Cependant, s'agit-il réellement d'un sujet hybride, destiné à rappeler à l'homme son ascendance animale lacustre, ou plutôt de la figuration d'une anomalie anatomique ? Il est en effet possible de voir dans cette statue la représentation d'une véritable queue chez un être humain.

Au cours de leur développement, les embryons humains sont un temps dotés, de façon physiologique et donc normale, d'une queue pouvant mesurer jusqu'à un sixième de leur taille totale. Toutefois, cet appendice s'atrophie au fil de la croissance, jusqu'à disparaître totalement au stade fœtal. Seul persiste chez l'adulte un bourgeon minuscule constitué de une à trois vertèbres coccygiennes (le coccyx), l'ensemble mesurant moins de trois centimètres de longueur.

Mais cette disparition souffre quelques exceptions. En effet, chez certains individus,

pour des raisons hormonales ou génétiques, cette queue embryonnaire peut perdurer (on parle de queue vestigiale) sous des formes et des aspects notablement différents d'un sujet à l'autre. Ce peut être une queue dure constituée de vertèbres accompagnées de tissus musculaires autorisant une mobilité, ou bien une queue molle uniquement composée de tissus vasculo-nerveux, avec parfois une matrice cartilagineuse. Dans certains cas, une forte pilosité recouvre ces queues ves-

Une pilosité importante confère parfois aux queues vestigiales de certains individus un aspect animal.

tigiales, leur conférant un aspect encore plus animal. Les garçons sont deux fois plus souvent porteurs d'une telle malformation que les filles.

Une prise en charge chirurgicale est la règle, l'opération étant le plus souvent effectuée peu de temps après la naissance. Cependant, la situation est plus complexe lorsque d'autres malformations sont associées : une fistule anale (une communication anormale entre deux zones d'ordinaire bien séparées), une anomalie du système génito-urinaire, une lésion vertébrale... De telles observations sont nombreuses dans la littérature médicale, avec des cas décrits en ex-Indochine, en Inde, au Japon, en France, aux États-Unis, etc.

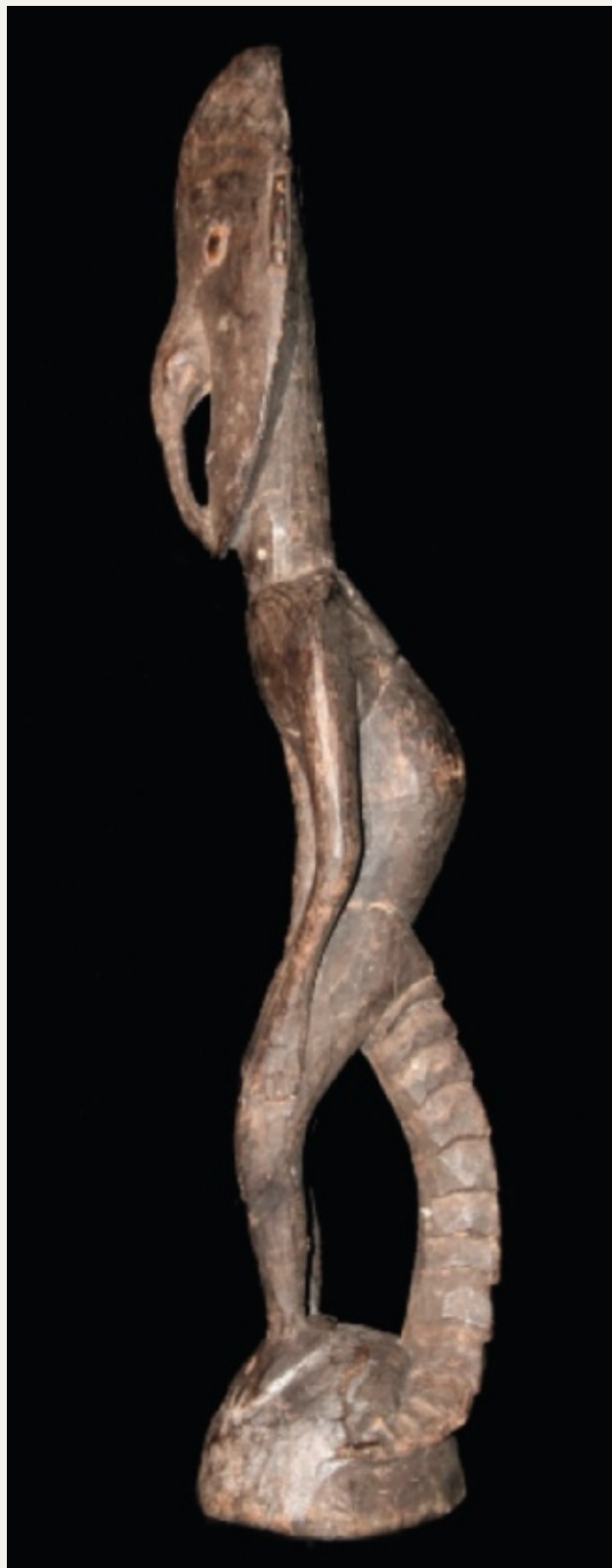
Dans ce dernier pays, le courant créationniste a récupéré ces malformations pour étayer diverses théories fantaisistes. Le point de départ fut un article paru dans le *New England Journal of Medicine* en 1982, où Fred Ledley, alors à l'Institut médical Howard Hughes, aux États-Unis, postulait, à partir du cas d'un de ses anciens patients, que l'observation de queues vestigiales chez des nouveau-nés mettait en évidence « la relation entre humains modernes et leurs ancêtres primitifs ». Les créationnistes ont réagi en affirmant que de telles malformations ne peuvent être que le fruit du hasard (la preuve étant leur diversité) et non le résultat de l'expression accidentelle d'un gène archaïque.

Rappelons que le créationnisme est une doctrine religieuse (surtout chrétienne, mais aussi partagée par quelques courants musulmans et juifs) s'opposant à l'évolutionnisme darwinien. Selon les créationnistes, la vie et la Terre ont été créées par Dieu comme le racontent les livres saints. Toutes les traces plaident pour une évolution des espèces (les fossiles, par exemple) ne seraient que des leurres disposés par Dieu pour fausser le jugement des hommes et les éloigner de la Vérité. Pourtant, l'homme a bien un ancêtre commun avec le crocodile !

Philippe CHARLIER travaille au Service de médecine légale et d'anatomie/cytologie pathologiques, à l'Hôpital universitaire Raymond Poincaré (AP-HP, UVSQ), à Garches.

Ph. Charlier, *Les monstres humains. Les malformations humaines dans l'Antiquité*. Paris, Fayard, 2008.

F. D. Ledley, *Evolution and the human tail : a case report*, *New England Journal of Medicine*, vol. 306(20), pp. 1212-1215, 1982.



 IDÉES DE PHYSIQUE

Le cerveau ausculté avec des supraconducteurs

Grâce à des circuits supraconducteurs, on est capable de mesurer d'infimes champs magnétiques, tels ceux produits par l'activité du cerveau.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

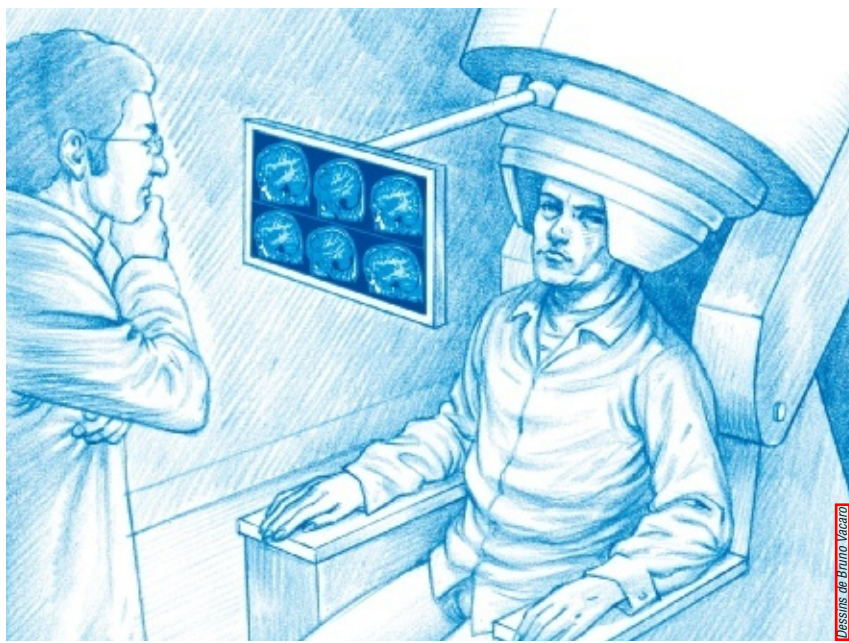
Quelles sont les zones du cerveau qui sont sollicitées lors de telle ou telle tâche cognitive ou qui présentent des anomalies ?

Pour répondre à ces questions, les méthodes d'exploration se sont multipliées : IRM, électroencéphalographie et plus récemment magnétoencéphalographie (ou MEG)... Cette dernière technique (voir la figure 1) est un tour de force, car les champs magnétiques créés par le cerveau sont un milliard de fois plus faibles que le champ magnétique

terrestre ! Mesurer de tels champs est néanmoins possible grâce à la supraconductivité, dont on fête cette année le centenaire de la découverte.

Le cerveau est le siège d'une activité physico-chimique et électrique. La propagation de signaux par les neurones est associée à des mouvements d'ions, donc à des courants électriques. Cela se traduit par la génération de champs électriques et magnétiques. Les potentiels électriques, de l'ordre de quelques dizaines de microvolts, sont

aisément détectés (par électroencéphalographie). C'est beaucoup plus difficile pour les champs magnétiques cérébraux, qui sont de l'ordre de 10^{-13} tesla – le champ magnétique terrestre vaut environ 5×10^{-5} tesla –, c'est-à-dire 100 fois moins que le champ magnétique créé au niveau de la tête par l'activité électrique du cœur. Or la supraconductivité, phénomène extrêmement sensible au champ magnétique, permet de détecter des champs aussi faibles.



1. LA MAGNÉTOENCÉPHALOGRAPHIE permet de suivre en temps réel l'activité du cerveau grâce à la mesure des minuscules champs magnétiques produits par les circuits neuronaux. La tête du patient est recouverte d'un casque tapissé de centaines de capteurs à base de SQUID, des circuits supraconducteurs. Ces circuits, très sensibles au champ magnétique, doivent être refroidis à très basse température, condition indispensable à la supraconduction.

La supraconductivité à la rescousse

Découverte en 1911 par le Néerlandais Kamerlingh Onnes, la supraconductivité apparaît brusquement dans certains matériaux au-dessous d'une très basse température (4 kelvins pour le mercure, soit -269°C !) ou dans certains composés à des températures un peu moins basses. Elle se manifeste par deux propriétés remarquables, l'une électrique et l'autre magnétique : un matériau supraconducteur conduit le courant électrique sans aucune résistance et expulse de son sein tout champ magnétique (effet Meissner).

L'origine de ces propriétés réside dans le comportement collectif des électrons libres : après s'être liés deux à deux en « paires de Cooper » malgré leur répulsion électrostatique, ils se regroupent dans un même état quantique qui s'étend dans tout le volume du matériau. Il s'agit d'une des rares manifestations directes de la physique quantique à l'échelle macroscopique.

Comment utiliser la supraconductivité pour mesurer des champs magnétiques ?

La première étape fut, en 1961, la découverte que le flux du champ magnétique à travers un anneau supraconducteur, c'est-à-dire le produit de la valeur du champ par l'aire traversée, est quantifié : il ne peut prendre que des valeurs égales à un multiple entier d'un « quantum » de flux, noté Φ_0 .

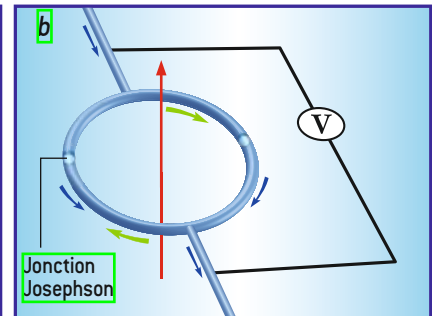
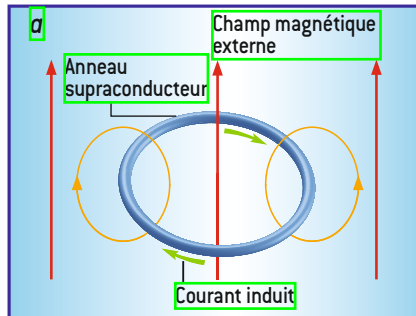
Les valeurs du flux étant discontinues, que se passe-t-il lorsqu'on fait varier continûment le champ magnétique extérieur à travers l'anneau ? Cette opération induit un courant le long de l'anneau, son intensité étant telle que le flux magnétique total, dû au champ extérieur et au champ engendré par le courant, soit conservé ou saute à la valeur permise la plus proche.

Ainsi, en augmentant peu à peu le champ extérieur, on observe que le courant induit dans l'anneau varie périodiquement avec le champ magnétique, ce courant ne s'annulant que pour les valeurs du champ extérieur qui donnent un flux multiple de Φ_0 . Or le quantum de flux (égal au rapport de la constante de Planck sur deux fois la charge électrique élémentaire) est extrêmement petit : il correspond au flux d'un champ magnétique de 2×10^{-11} tesla sur un centimètre carré. On détient donc potentiellement le phénomène ayant la bonne sensibilité pour mesurer les champs magnétiques cérébraux.

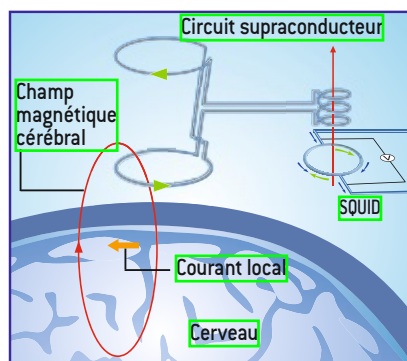
Un circuit astucieux : le SQUID

La seconde étape fut l'invention en 1964 de circuits nommés SQUID (voir la figure 2). Connectons de part et d'autre d'un anneau supraconducteur un fil supraconducteur où circule un courant, le « courant de polarisation ». En l'absence de champ magnétique, ce courant se répartit également entre les deux branches de l'anneau. Avec un champ magnétique, s'ajoute le courant induit ; dans l'une des branches, le courant est alors plus intense que la moitié du courant de polarisation (et plus faible dans l'autre). Enfin, au milieu de chacune des branches, introduisons dans le fil supraconducteur une coupure, assez mince pour que les paires d'électrons puissent la traverser par effet tunnel.

À cet endroit, nommé jonction Josephson, tant que le courant est inférieur à une



2. LORSQU'UNE BOUCLE DE MATÉRIAU supraconducteur (a) est soumise à un champ magnétique externe (flèches rouges), un courant y est induit (flèche verte). Ce courant induit crée un champ magnétique (lignes orange) qui compense le champ externe, de façon que le flux magnétique à travers la boucle reste égal à zéro ou à un multiple entier du quantum de flux. Dans un SQUID (b), la boucle supraconductrice est interrompue en deux endroits et reliée à un fil supraconducteur où passe un courant (flèches bleues). Le courant induit (flèche verte) par le champ externe s'ajoute et fait que dans la branche droite de la boucle, le courant total peut dépasser le seuil au-delà duquel la supraconductivité disparaît. Une tension aux bornes de la boucle est alors mesurable, tension qui permet de déterminer l'intensité du champ magnétique externe.



3. POUR MESURER LE CHAMP MAGNÉTIQUE à proximité du cerveau tout en s'affranchissant des champs magnétiques parasites (champ terrestre, champ créé par l'activité du cœur, etc.), un SQUID est couplé à un second circuit supraconducteur comportant deux boucles et un petit bobinage. Le champ magnétique (ligne rouge) créé par un petit courant électrique (flèche orange) dans le cerveau est plus intense au niveau de la première boucle que de la seconde. Pour que le flux magnétique soit constant dans le circuit, un courant y est induit (flèches vertes), lequel crée dans le petit bobinage un champ magnétique (flèche rouge). Ce champ est détecté et mesuré par le SQUID.

valeur critique (qui dépend notamment de l'épaisseur de la coupure), la supraconductivité persiste comme si de rien n'était. En revanche, dès que le courant dépasse la valeur critique, les paires d'électrons se dissocient, les électrons redeviennent libres et se cognent au réseau cristallin : il apparaît une résistance, donc une tension de part et d'autre de la jonction, d'autant plus élevée que le courant dépasse le courant critique.

Toute l'astuce consiste alors à polariser le SQUID en faisant circuler un courant très légèrement inférieur au double du courant critique. En l'absence de champ magnétique, le courant qui passe dans chacune des branches est inférieur au courant critique : aucune tension n'apparaît dans le circuit. En revanche, la présence d'un champ magnétique se traduit, en raison du courant induit, par un courant supérieur à la valeur critique dans l'une des branches et donc par une tension aux bornes de l'anneau. Plus le champ est intense, plus le courant induit et l'écart au courant critique seront forts, et plus la tension sera élevée.

En calibrant le SQUID, on peut donc remonter de la valeur de la tension à celle du champ magnétique qui traverse l'anneau. Avec cette géométrie, ce dispositif est semblable dans son principe à un interféromètre où deux ondes quantiques passant par des chemins distincts interfèrent. D'où le nom de SQUID,

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

BIBLIOGRAPHIE

J. C. Gallop, *SQUIDS, the Josephson Effects and Superconducting Electronics*, Institute of Physics Publishing, 1991.



Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

pour *Superconducting Quantum Interference Device* (dispositif supraconducteur à interférence quantique).

L'utilisation directe d'un SQUID est toutefois délicate : sa surface est petite (une dizaine de micromètres carrés) et il est sensible à toutes les perturbations magnétiques. Pour y remédier, on utilise un capteur constitué d'un circuit supraconducteur comportant deux boucles de un centimètre de diamètre, distantes de cinq et enroulées en sens opposés, et un petit enroulement couplé au SQUID (voir la figure 3).

À cause de l'effet Meissner, les lignes de champ ne peuvent pas traverser le fil supraconducteur pour entrer ou sortir des anneaux : il s'ensuit que le flux magnétique total dans le circuit reste constant. Pour un champ magnétique uniforme ou presque, tels le champ terrestre ou des champs para-

sites dont la source se trouve loin du détecteur (cas du champ magnétique associé au cœur), le même champ traverse les deux boucles et comme ces dernières ont des sens de circulation opposés, le flux magnétique total est nul.

En revanche, pour une source proche, par exemple un ensemble de neurones, le champ n'est pas homogène ; il est bien plus intense dans la boucle la plus proche de la source. Par conséquent, la somme des flux à travers les deux boucles n'est pas nulle : un courant est induit dans le circuit afin que le flux magnétique dans le petit enroulement compense le flux des grandes boucles et maintienne un flux total nul. Le champ magnétique engendré par l'enroulement, proportionnel au champ magnétique cérébral, est ainsi plus facilement mesurable par le SQUID.



Et tout s'éclaire



La marche des sciences
14h/15h jeudi

avec Aurélie Luneau
en partenariat avec le magazine Pour la Science

franceculture.com

SCIENCE & GASTRONOMIE

Dernières nouvelles des soufflés

Pour que le soufflé monte bien, assurez-vous que la préparation contienne beaucoup d'eau et d'air avant de l'enfourner.

Hervé This



Le soufflé est le prototype du produit culinaire qui gonfle à la cuisson. Il n'est pas seul : les gougères, les petits choux, les cannelés gonflent... Une partie du monde culinaire attribuait le gonflement à la dilatation des bulles d'air, qui proviennent des blancs d'œuf battus, comme dans les soufflés ; mais la raison n'y trouvait pas son compte : la loi de la dilatation des gaz, appliquée aux soufflés, ne prévoyait qu'un gonflement de moins de 30 pour cent, bien inférieur à celui obtenu quotidiennement par les cuisiniers.

Nous avons montré que le mécanisme principal du gonflement des soufflés et des autres plats analogues était l'évaporation de l'eau de la préparation. D'une part, un soufflé de 300 grammes perd environ dix grammes à la cuisson, ce qui (si cette masse est de l'eau évaporée, mais que pourrait-elle être d'autre ?) correspond à dix litres de vapeur ! D'autre part, la cuisson des soufflés dans des moules transparents et équipés de capteurs de température montre qu'au fond des ramequins, on atteint bien les 100 °C indispensables à l'évaporation de l'eau, tandis que l'on voit, à travers les parois des ramequins, des bulles monter dans la préparation et venir crever en surface.

Tout est-il dit ? Apparemment pas. Lors de récentes réunions du *Groupe d'étude des précisions culinaires*, à Paris, nous avons testé diverses précisions relatives aux soufflés, notamment la retombée des soufflés cuits dans des fours dont on ouvre la porte, l'influence du farinage des moules, etc. Nous avons testé des soufflés au fromage de composition « professionnelle » :

la base dense comportait 75 grammes de farine, 75 grammes de beurre, 750 grammes de lait, quatre jaunes d'œuf, 200 grammes de fromage râpé ; après cuisson, deux jaunes d'œuf supplémentaires étaient ajoutés, ainsi que dix blancs d'œuf battus en neige ferme.

Les ramequins étaient des objets professionnels en céramique blanche, et les conditions de production des « appareils » à soufflés (les cuisiniers nomment « appareil » la préparation destinée à cuire), tout comme celles de cuisson, étaient aussi bien contrôlées que possible. Cette rigueur a révélé des surprises. Tout d'abord, les ramequins n'étaient identiques qu'en apparence : alors que leur taille était constante, leur masse variait considérablement, ce qui indique que leurs épaisseurs étaient différentes ; pas étonnant, donc, que l'on obtienne parfois en cuisine des résultats très différents.

En ce qui concerne la tenue des soufflés à l'ouverture de la porte, nous avons constaté une tenue bien supérieure à tout ce qui est prétendu. Le soufflé ayant été cuit à 180 °C dans un four à convection, un gonflement notable a été observé après dix minutes de cuisson.

C'est le moment qui a été choisi pour l'ouverture du four : durant une minute, nous avons laissé le soufflé dans le four, en espérant le voir redescendre... mais non, il est resté stable. Nous l'avons même sorti du four, et après 3 minutes et 40 secondes, il était très peu redescendu. Bref, à ce stade, la croûte superficielle, et sans doute la cuisson de la partie supérieure, suffit à tenir le soufflé gonflé, la vapeur ne s'échappant pas par la partie supérieure ni ne se recondensant.

Le soufflé fut alors remis au four, parce que nous avions voulu le comparer à un soufflé dont les blancs d'œuf n'auraient pas été battus en neige : après tout, puisque la théorie stipulait que la dilatation des bulles d'air était presque sans effet sur le gonflement, pourquoi s'embarrasser de ce battage préalable ?

Le verdict expérimental a été sans appel, à la surprise des professionnels : le soufflé aux blancs non battus en neige est monté presque autant que le soufflé identique, mais avec des blancs battus. Presque autant... mais pas tout à fait, parce que l'air introduit contribue au volume de la masse.

Cette observation, qui a stupéfié le monde professionnel, donne de nouvelles clefs pour réussir les soufflés : nous savons maintenant que l'objectif est de vaporiser le plus d'eau possible et nous savons que tout l'air initialement introduit dans les soufflés sous la forme de blancs d'œuf en neige contribue au volume final. Puisque l'on sait produire des litres et des litres de blanc en neige à partir d'un seul blanc d'œuf, en lui ajoutant de l'eau quand on le bat, on sait partir d'un fort volume initial... qui augmentera encore à la cuisson.



Hervé THIS dirige le groupe INRA de gastronomie moléculaire au Laboratoire de chimie d'AgroParisTech. Il est aussi directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Acad. des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr

→ PHILOSOPHIE DES SCIENCES

Forme et origine de l'Univers

Sous la direction
d'A. Barrau et de D. Parrochia

Dunod, 2010
(410 pages, 29 euros).

Revenir sur des moments clefs de l'histoire de la cosmologie, en présenter les grandes articulations actuelles et offrir une réflexion philosophique sur ses tenants et aboutissants, tels sont les trois objectifs de ce livre collectif. L'entreprise est réussie.

Sur le plan historique, l'ouvrage présente la logique de certaines cosmologies de l'Antiquité; il analyse les mises en garde d'Emmanuel Kant, d'Auguste Comte et de Gaston Bachelard vis-à-vis des prétentions de toute cosmologie à pouvoir décrire l'Univers; ou encore, il rappelle comment, par un renversement de ces formes de scepticisme, le modèle du Big Bang fut inventé.

Concernant la situation actuelle, le livre présente la version du modèle du Big Bang sur laquelle existe de nos jours un large consensus; il explore les liens unissant les recherches sur l'infiniment petit et celles sur l'infiniment grand; il évoque des théories – cosmologie quantique et théorie des cordes –

qui pourraient servir à mieux comprendre les « premiers instants » de l'Univers auxquels conduit ce modèle du Big Bang; ou encore, il se penche sur les modèles d'univers multiples développés aujourd'hui.

Sur le plan épistémologique, certains auteurs abordent de front la question du caractère scientifique de la cosmologie; ils réfléchissent à la possibilité, ou à l'impossibilité, d'un discours sur l'origine, et tentent d'appréhender le concept de temps utilisé en cosmologie.

Comme la plupart de ses chapitres sont clairs, cet ouvrage constitue une très riche source d'informations et de réflexions sur la cosmologie, que l'on peut recommander à tous les esprits curieux. On regrettera juste qu'un ouvrage qui est présenté comme un ensemble de « regards philosophiques sur la cosmologie » ne contienne pas d'approche plus critique vis-à-vis de cette discipline. Si analyser les discours scientifiques pour en apprécier les significations et conséquences est précieux, prendre du recul par rapport à ces discours l'est aussi.

→ Thomas Lepeltier

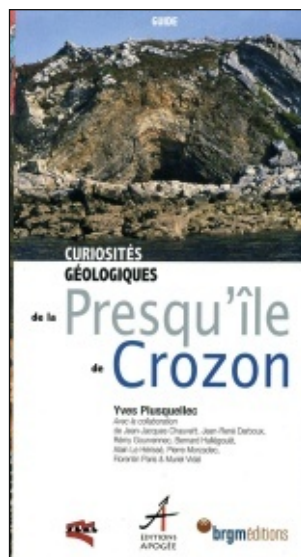
Historien des sciences, Oxford

→ GÉOLOGIE

Curiosités géologiques de la presqu'île de Crozon

Sous la direction
de Yves Plusquellec,
BRGM/Éditions Apogée, 2010
(110 pages, 19 euros).

Entre rade de Brest et baie de Douarnenez, la presqu'île de Crozon forme une des pointes occidentales de la Bretagne. À ses contours déchaquetés correspond une géologie com-



pliquée, comme le démontre assez sa carte géologique.

Cette complexité est le reflet d'une longue histoire, qui débute au Briovérien (550 millions d'années), puis se déroule surtout au Paléozoïque, de l'Ordovicien (480 millions d'années) au Dévonien (360 millions d'années). Au début de cette période, la région du Massif armoricain se trouve sur la bordure Nord du grand continent austral du Gondwana. La tectonique des plaques va rapprocher ce dernier des masses continentales plus septentrionales, fermant ainsi l'océan rhéique et provoquant enfin la surrection de la grande chaîne hercynienne.

Les roches de la presqu'île de Crozon, riches en fossiles marins (trilobites, graptolites, brachiopodes, coraux et aussi microfossiles), témoignent de cette riche histoire. On y trouve aussi bien des traces d'une importante activité volcanique que celles de la grande glaciation de la fin de l'Ordovicien, qui affecta pratiquement toute l'Afrique et les contrées adjacentes. La fin de la sédimentation marine, au Dévonien supérieur, ne marque pas cel-

le de l'histoire géologique de la presqu'île, car les sédiments paléozoïques sont alors fortement plissés et faillés lors de l'orogénèse hercynienne. De l'histoire ultérieure de la région, les roches nous disent peu de chose, jusqu'aux périodes glaciaires récentes, qui laissent des traces caractéristiques dans les sédiments des plages et des tourbières.

Les auteurs racontent toute cette histoire, en s'appuyant sans cesse sur les données géologiques et paléontologiques, sous forme d'illustrations aussi abondantes que belles. Le livre est aussi un guide de terrain, accompagnant le visiteur à sept points présentant des intérêts particuliers. Les cartes géologiques et autres échelles stratigraphiques qui y figurent complètent heureusement cette synthèse réussie et accessible de la géologie exceptionnelle de cette partie de la Bretagne.

→ Eric Buffetaut

CNRS, Laboratoire de géologie de l'ENS

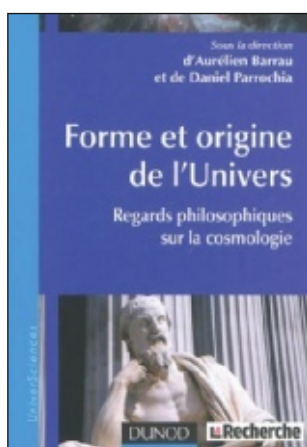
→ HISTOIRE DES SCIENCES

Les dessins de champignons de Claude Aubriet

Xavier Carteret
et Aline Hamonou-Mahieu

Publications scientifiques
du MNHN, 2010
(330 pages, 97 euros).

Cet ouvrage met en lumière les représentations de champignons effectuées vers 1730 par l'illustrateur scientifique et peintre miniaturiste Claude Aubriet sous la direction d'Antoine de Jussieu. Intégralement bilingue français-anglais et donnant la part belle à la reproduction des planches, il constitue un témoi-

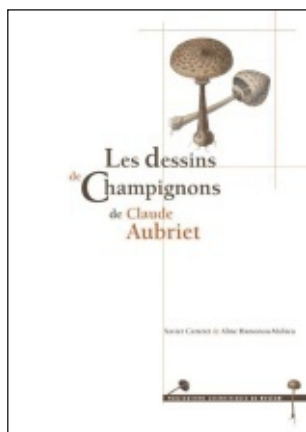


gnage précieux d'une œuvre rare de précision pour l'époque.

Élève de Jean Joubert et «peintre en miniature» de Louis XIV, puis de Louis XV, Claude Aubriet a réalisé près de 600 miniatures sur vélin pour la collection royale, tout en répondant aux commandes du milieu scientifique parisien. C'est en accompagnant Tournefort (dont il illustra les *Éléments de botanique*) lors de son voyage au Levant qu'il devint l'un des premiers dessinateurs d'histoire naturelle à suivre au long cours un botaniste.

L'ouvrage est composé de 97 planches en couleur et annotées, qui nous éclairent sur les espèces présentées. Tout au long de ses pages, on savoure les couleurs des gouaches et lavis d'Aubriet tout comme la finesse de son trait. On s'attarde ainsi sur les méandres de l'helvelle crépue, sur la finesse du *Pleurotus ostreatus*, et on salive à la vue du *Macrolepiota procera*.

Les auteurs montrent comment cette œuvre précise et fidèle



fut décisive dans l'histoire de l'illustration et des classifications mycologiques. Au XVIII^e siècle, on identifiait encore mal la nature exacte des champignons, et donc ce qu'il fallait représenter...

→ Josquin Debaz
GSPR, EHESS, Paris

→ ARCHÉOLOGIE

Les objets racontent Lattara

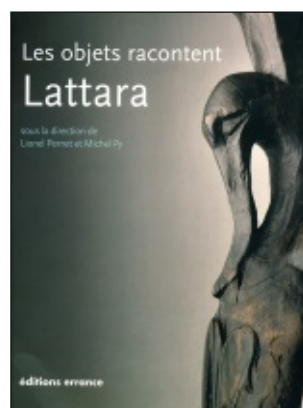
Sous la direction
de Lionel Pernet
et de Michel Py
Errance, 2010
(95 pages, 20 euros).

Lattara, c'est aujourd'hui Lattes, au Sud de Montpellier. Cette cité proto-historique, puis antique, exista du VI^e siècle avant notre ère au II^e siècle de notre ère. Ses huit siècles d'histoire sont ici racontés par les objets exhumés lors des fouilles archéologiques de la cité, ce qui donne un très bel ouvrage tout en couleur et images.

Les 25 auteurs, tous archéologues, abordent ici le contexte de la découverte, l'histoire et la chronologie de plusieurs dizaines d'objets, nous confiant les renseignements obtenus à la faveur de leurs analyses. C'est donc à un ouvrage de haute tenue scientifique que l'on a affaire, ce qui n'empêche ni de comprendre facilement ni de ne jamais perdre le fil historique du début à la fin de l'ouvrage. Certaines notes sont consacrées à un unique objet, parce qu'il s'agit d'une trouvaille exceptionnelle, telle la remarquable statue de guerrier méditerranéen du VI^e ou V^e siècle avant notre ère (son type de cuirasse est alors attesté sur tout le pourtour méditerranéen occidental) trouvée à Lattara, ou encore l'inscription offerte par Titus Eppilius Astrapon aux artisans et transporteurs de la Lattara d'époque romaine. D'autres abordent une thématique particulière à travers l'ensemble des éléments matériels qui s'y rapportent (commerce; tissu, parure et habillement; batterie de cuisine, etc.).

Ces objets sont en effet porteurs d'une énorme somme d'in-

formations; c'est notamment grâce à eux que M. Py et ses collaborateurs ont écrit l'histoire d'une cité dont seul le nom antique était



connu. Ils permettent de dater les évolutions du tissu urbain, apportent des données précises sur le commerce, car une grande partie d'entre eux provient de régions limitrophes ou lointaines de l'actuel Languedoc, et nous révèle des pans entiers de la vie quotidienne de ses habitants. C'est sans doute ce dernier aspect qui est à la fois troublant et émouvant: à travers la présentation de parures portées par ces gens, de témoins d'écriture, parfois maladroite, d'objets utilisés au quotidien, on parvient à pénétrer dans l'intimité des habitants de Lattara.

Établis au bord d'une lagune ouverte sur la mer, ces derniers ont fait évoluer leurs habitudes et leur façon de vivre à la faveur des étroits contacts qu'ils entretenaient avec les autres peuples établis sur le pourtour de la Méditerranée. Amphores vinaires et disques à rebord perlé illustrent ainsi les relations établies avec les Étrusques dès le VI^e siècle avant notre ère, tandis qu'une perle égyptienne d'époque romaine témoigne de la présence d'un voyageur ou d'un marchand oriental. La découverte la plus

Brèves

LE BESOIN DE L'AUTRE

Pierre Karli
Odile Jacob, 2011
(270 pages, 24,90 euros).

Spécialiste renommé de la biologie du comportement, l'auteur livre ici un ouvrage sur la façon dont la relation à l'autre nous structure et induit les «soi» personnel, relationnel et collectif que nous construisons. Cette prise de conscience de notre «besoin de l'autre» achevée, il nous invite à réaliser aussi le «besoin de nous» de l'autre. Un ouvrage aussi humaniste que passionnant, car profondément fondé en science.



LE CONTACT

Études présentées par
Christophe Donnet,
Nicolas Mathevon
et Éliane Viennot

Université de Saint-Étienne, 2010
(290 pages, 25 euros).

Il y a bien des façons d'envisager le contact. En voici 19, allant du contact des peaux à celui des solides dans la physique scolastique, en passant par le contact des langues ou avec la matière extraterrestre... Assemblés après le colloque de 2010 de l'Institut universitaire de France, ces échanges transdisciplinaires sont aussi variés qu'intéressants.

RECHERCHES ARCHÉOLOGIQUES AU CŒUR DE FORUM IULII

Lucien Rivet
Errance, 2010
(420 pages, 39 euros).

Ce rapport de fouille sur le site épiscopal de Fréjus, l'une des toutes premières villes romaines et chrétiennes des Gaules, arrive 20 ans après la fin de la dernière des fouilles qu'il décrit. C'est dire la rareté et la valeur de ce document, par ailleurs aussi accessible à la lecture que bien illustré.

Brèves

LES MAGICIENS DE LA LUMIÈRE

Serge Guyon et Christine Azemar (réal.), SCAVO, Université Paris-Sud 11, 2010 (DVD, 23 euros par la Poste).



En 1862, Léon Foucault, le père du célèbre pendule éponyme, mesurait la vitesse de la lumière avec une précision jusque-là inégalée. Pourquoi ? Comment ? Dans quel contexte scientifique et historique ? C'est ce que raconte cette fiction historique avec, pour toile de fond, le débat sur la nature ondulatoire ou corpusculaire de la lumière. En bonus, des entretiens scientifiques et des documents offrent un éclairage pédagogique sur ce tournant de l'histoire de la physique.

LES FONCTIONS : DES ORGANISMES AUX ARTEFACTS

Jean Gayon et Armand de Ricqlès (sous la dir.), PUF, 2010 (448 pages, 29 euros).



Quelle est la fonction de telle molécule ? Classique en biologie, cette question n'est pas anodine : elle suggère qu'on va expliquer la molécule par ses effets. Quelle définition donner à la fonction pour s'affranchir d'une telle interprétation finaliste ? Dans cet ouvrage universitaire, philosophes, historiens et biologistes examinent et poursuivent les débats qui entourent cette question depuis 30 ans.



LA DROITE AMOUREUSE DU CERCLE

Didier Nordon Hermann, 2011 (1997, 2^e éd.) (112 pages, 24 euros).

Où la vie des objets mathématiques (entre autres) quand les mathématiciens sont couchés. Entre Oulipo et poésie, ce petit livre savoureux de notre bloc-noteur préféré vaut bien ce léger écart éditorial !

spectaculaire reste cependant celle d'un fragment de toile en cachemire, daté du V^e siècle avant notre ère, qui provenait d'Asie centrale. On imagine, 1700 ans avant Marco Polo, le long chemin emprunté par cette pièce de tissu...

Mais c'est sans doute dans l'évocation des pratiques culinaires et domestiques que réside la grande originalité de l'ouvrage : on y apprend que les Lattariens (les habitants de la cité) mangeaient des cerises, des prunes, des noix, des pêches et du melon, qu'ils appréciaient la côte de bœuf, le jarret de veau ou le gigot d'agneau, la daurade royale, le loup, la sole, tout en ne dédaignant pas les cervidés et les oiseaux aquatiques. Ils décoraient parfois le sol de leur maison avec des coquillages et récupéraient sur la grève les restes des baleines grises échouées... Et on se prend à rêver, à imaginer, ce que pouvait être leur vie, au bord d'une mer généreuse et encore préservée. Un bien beau livre en définitive.

→ Stéphane Mauné
CNRS, Montpellier

→ MÉDECINE

La naissance

Sous la direction de R. Frydman et M. Szejer Albin Michel, 2010 (1401 pages, 65 euros).

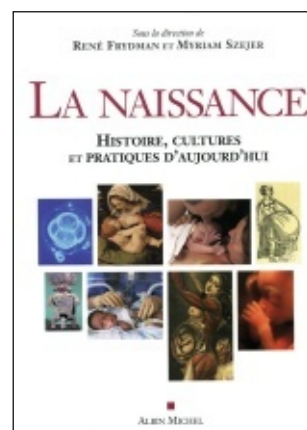
Difficile de rendre compte d'une encyclopédie ! Cette somme est le premier travail consacré à la naissance d'une telle ampleur et en langue française. L'obstétricien René Frydman a dirigé ce projet avec la pédopsychiatre et psychanalyste Myriam Szejer, sa collaboratrice dans le Service de gynécologie-obstétrique-médecine de

la reproduction de l'Hôpital Antoine-Béclère de Clamart, où sont nés le premier bébé-éprouvette français et le premier bébé issu d'un embryon congelé. C'est dire de quel endroit prestigieux émane cette tentative de traiter la naissance sous tous les angles tout en la plaçant dans son contexte culturel.

Pas moins de 180 spécialistes de nombreux horizons ont contribué, dont nombre de médecins, mais aussi des anthropologues, des psychologues, des historiens, etc. L'ouvrage est structuré en deux grandes parties intitulées « Histoire et culture » et « Les pratiques aujourd'hui ». Pour l'illustration, le choix a été fait de combiner des images en noir et blanc au fil du texte avec deux cahiers intérieurs en couleur.

L'ouvrage commence par l'article du philosophe Philippe Gaudin « Philosophies et monothéismes nous rappellent à la dimension métaphysique et éthique de la naissance, sa part maudite comme sa part bénie ». L'historienne de l'Antiquité italienne Eva Cantarella nous décrit ensuite une « Mythologies de la naissance dans l'Antiquité gréco-latine ». Le regretté spécialiste de l'Antiquité tardive Michel Meslin contribue pour sa part à un article sur « L'origine de l'humain dans certaines sociétés traditionnelles ».

Pour vraiment rendre compte de la diversité des aspects et des pensées sur la naissance, les directeurs de l'ouvrage n'ont craint ni les contributions se chevauchant ni les positions contradictoires. Par exemple, l'article du pédopsychiatre Jacques Dayan sur le « Déné de grossesse » et celui de sa



consœur Liliane Daligand sur « L'infanticide » présentent tous deux la différence entre dénégation et déni, de points de vue quelque peu différents.

Les neuf articles de la fin de l'ouvrage balayent les interrogations portées par la naissance, notamment ses enjeux pour l'avenir. On passe ainsi de « Feux d'artifice ou l'artificialisation de la procréation » de R. Frydman à un passionnant encadré de la psychanalyste Liliane Fainsilber sur « Les rêves de grossesse masculine », puis à « Naissance de demain et éthique » par le professeur de médecine et spécialiste de l'éthique médicale Didier Sicard.

L'ambition de mettre en relation une diversité de points de vue est ainsi poussée loin, et bien servie par une belle illustration, une signalétique efficace. Mais l'absence déconcertante d'un index complique la fréquentation de cette belle et importante encyclopédie de la naissance.

→ Cédric Crémère
Historien des sciences,
Muséum du Havre



Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur : www.pourlascience.fr