

■ POUR LA SCIENCE

Juillet 2011 - n° 405

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

L'HYDROGÈNE

Une énergie propre pour demain ?

Le zéro absolu

Un piège inspiré
du démon de Maxwell

Crises de conscience

L'étude de l'épilepsie éclaire
diverses facettes de la conscience

Sexualité

Les vertébrés s'accouplent
depuis 375 millions d'années

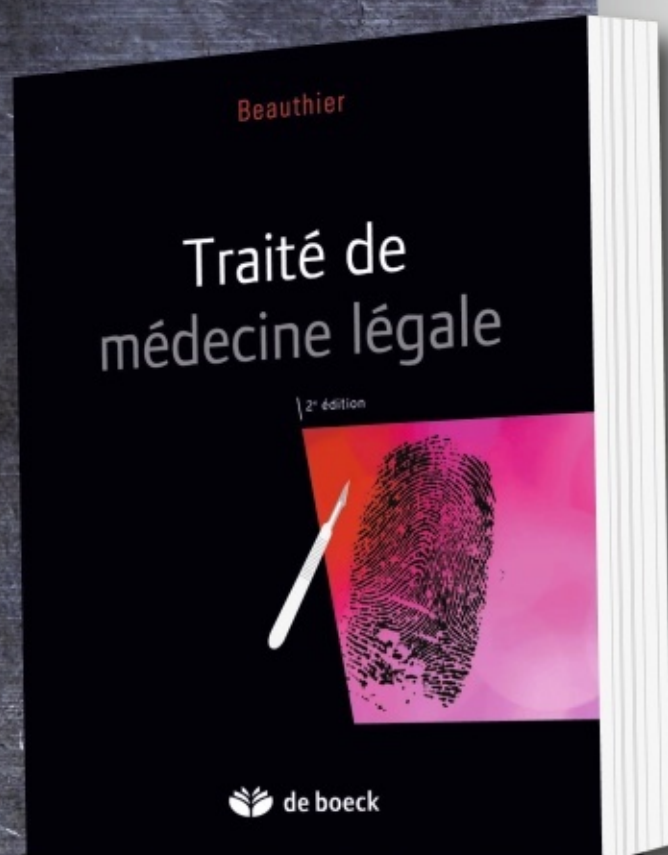


M 02687 - 405 - F: 6,20 €



France métro : 6,20 € - DOM s : 7,30 € - BEL : 7,20 € - CH : 12 FS - CAN : 10,95 \$ can - Grèce : 7,60 € - LUX - Italie - PORT cont : 7,20 €
- AND : 6,20 € - ALL : 9,30 € - MAR : 60 DH - TUN : 6,70 TND - REU av : 9,30 € - TOM surf : 980 F CFP - TOM av : 1770 F CFP

Traité de médecine légale 2^e édition



Parution mai 2011
1040 pages - 110 €



Sous la direction de Jean-Pol Beauthier

Médecin légiste, docteur en sciences médicales. Il est responsable du master complémentaire en médecine légale et enseigne cette discipline à l'Université Libre de Bruxelles mais également à l'École régionale et intercommunale de Police de Bruxelles, à l'Institut de Formation Judiciaire et à l'École nationale de Recherche de la Police fédérale. Il est collaborateur scientifique à l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique (département de paléontologie, laboratoire d'anthropologie).

Un ouvrage unique en langue française, fruit d'une collaboration regroupant des scientifiques belges, français et suisses.

Apports de la 2^e édition

- De nouvelles notions intéressant la biomécanique osseuse, les traumatismes osseux, l'anthropologie physique et la paléopathologie, l'effet des hautes températures sur la voûte crânienne, les nouveautés à propos de l'âge au décès, ont été apportées grâce au dynamisme des médecins légistes, anthropologues, biomécaniciens et autres scientifiques passionnés par l'anthropologie sous toutes ses formes.
- L'imagerie médicale a permis de combler certains aspects difficiles, et notamment la traumatologie laryngée.
- L'évolution de la balistique a nécessairement conduit à la révision de ce chapitre.
- Il en est de même de la génétique, où les aspects de l'analyse de l'ADN ancien ont été introduits.
- La toxicologie a été modernisée et complétée de manière majeure.
- L'hyperthermie maligne, syndrome redoutable s'il en est, a bénéficié d'une révision actualisée de la littérature médicale.
- Références bibliographiques complétées et actualisées.

Ce livre s'adresse aux :

Professeurs et étudiants en médecine légale et criminologie, médecins légistes, médecins praticiens généralistes et spécialistes, policiers et auxiliaires de police, juristes.

En librairie et
sur www.deboeck.com

 **de boeck**

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

8 rue Férou, 75278 PARIS CEDEX 06
Standard : Tel. 01 55 42 84 00

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

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 :

Michel Arthur, David Baratoux, Xavier Bonnet, Cécile Chevrier, Frédéric Chevy, Jean-Philippe Chippaux, Gaël Clément, Serge Crouzy, Étienne Dombre, Sophie Gallé-Soas, Marion Guillaume, Edith Heard, Étienne Kœchlin, Sid Kouider, Bruno Malaizé, Mickaël Naassila, Christophe Pichon, Alberto Podjarny, Emili Saló, Daniel Tacquenot.

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 livres ou de magazines :

0805 655 255 (numéro vert)

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 contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des Grands-Augustins - 75006 Paris).



Démons maîtrisés

Pierre Simon de Laplace (1749-1827) imagina qu'un esprit supérieur qui connaîtrait à un instant donné tous les mouvements des composantes de l'Univers pourrait en prédire l'état n'importe quand dans le futur. Le démon de Laplace est une expérience de pensée qui matérialise le déterminisme, selon lequel tous les événements physiques, quelle que soit leur échelle, obéiraient aux lois de causalité. Comme celui de Laplace, le démon de Maxwell a une connaissance parfaite du monde, mais à l'échelle des molécules. Le physicien James Clerk Maxwell (1831-1879) – le père de l'électromagnétisme – imagina qu'un démon pourrait trier les molécules d'un gaz en fonction de leur vitesse, et les séparer, au moyen d'une cloison qu'il commanderait, en une partie froide et une partie chaude. Un tel tri viole les lois de la thermodynamique.

Or des physiciens ont mis au point un dispositif expérimental qui joue le rôle du démon de Maxwell et permet d'atteindre des températures proches du zéro absolu. Outre les applications techniques envisagées, ce superfroid pourrait révéler des états inédits de la matière,

Un démon plus facétieux que diabolique

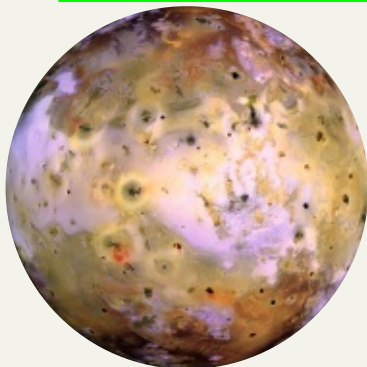
voire permettre de sonder les propriétés de l'antimatière (voir *Un démon de Maxwell pour refroidir les atomes*, page 56).

Au VI^e siècle avant notre ère, Socrate lui-même fit appel à un démon. Pour lui, il s'agissait d'une force invisible ou d'une voix intérieure qui l'empêchait d'accomplir une mauvaise action au moment où il en ressentait l'impulsion. Le démon de Socrate a été interprété comme la première expression de la notion de conscience. Or certains neurobiologistes qui étudient la conscience suivent des personnes épileptiques. Plus que toute autre, l'épilepsie a longtemps été considérée comme une manifestation de quelque démon. Aujourd'hui, l'étude des troubles du comportement qui lui sont associés permet de préciser quelques caractéristiques de la conscience, un champ d'étude encore quasi vierge (voir *Les crises de la conscience*, page 40).

Mais le démon de Socrate tenait plus du bon génie que de l'esprit maléfique. Celui de Maxwell était plus facétieux que diabolique. Celui de Laplace était-il trop ambitieux ? Les scientifiques qui cherchent à prévoir le climat futur le pensent sans doute, car ils ne parviennent pas (encore ?) à débarrasser leurs modèles de toute incertitude (voir *Une bande de précipitations mouvante*, page 62).

1 **ÉDITO**4 **BLOC-NOTES**
Didier Nordon

Actualités

6 **Un océan de magma sous Io**

7 **ADN-ARN : une copie infidèle**
 12 **La danse des chromosomes X**
 12 **L'argent espagnol d'Europe et d'Amérique**
 ... et bien d'autres sujets.

14 **ON EN REPARLE**

Opinions

16 **POINT DE VUE**
Vitamine D : des insuffisances à éliminer
 Laure Esterle

17 **DÉVELOPPEMENT DURABLE**
L'innovation au service des plus pauvres
 Patrick Kohler

20 **VRAI OU FAUX**
Le CO₂ est-il le principal gaz à effet de serre ?
 Hervé Le Treut

22 **QUESTIONS OUVERTES**
Le baclofène : un relaxant musculaire efficace contre la dépendance à l'alcool ?
 Jean-Pol Tassin
 D'un côté, les « résolument pour ». De l'autre, les « foncièrement sceptiques ». Pour dépasser les luttes d'opinions, des études scientifiques validées sont indispensables.

À LA UNE

26 **ÉNERGIE**

L'hydrogène,

une énergie propre pour demain ?

V. Artero, N. Guillet, D. Fruchart et M. Fontecave

Produire de l'hydrogène, le stocker et le convertir en électricité à la demande est désormais possible. Pour que la filière hydrogène devienne compétitive, il reste à en réduire le coût. Les chimistes s'inspirent de bactéries pour perfectionner les catalyseurs utilisés.

36 **ÉNERGIE**

De l'énergie issue des feuilles artificielles

Antonio Regalado

La photosynthèse utilise la lumière du Soleil et l'eau pour produire de l'énergie. Pourrait-on imiter ce procédé naturel pour obtenir de l'hydrogène ?

40 **NEUROSCIENCES**

Les crises de la conscience

Don Tucker et Mark Holmes

En observant comment la conscience est altérée lors de certaines crises d'épilepsie, les neuroscientifiques comprennent mieux son fonctionnement normal et découvrent des réseaux cérébraux impliqués.

52 **TECHNIQUES MÉDICALES**

Les gélules robots

Paolo Dario et Arianna Menciassi

Un voyage dans le corps humain n'est plus du domaine de la science-fiction. De minuscules « robots » pourraient bientôt aider au diagnostic, effectuer des interventions chirurgicales et administrer des médicaments.

56 **PHYSIQUE****Un démon de Maxwell
pour refroidir les atomes***Mark Raizen*

Une expérience de pensée du XIX^e siècle inspire une technique permettant de manipuler des atomes afin de les ralentir et d'abaisser leur température à des valeurs proches du zéro absolu.

62 **CLIMATOLOGIE****Une bande
de précipitations mouvante***Julian Sachs et Conor Myhrvold*

En cartographiant les précipitations équatoriales sur le Pacifique depuis l'an 800, les scientifiques reconstituent les déplacements de la ceinture pluviale. Ils obtiennent ainsi un aperçu de l'évolution du climat tropical d'ici 2100.

68 **PALÉONTOLOGIE****Premiers accouplements***John Long*

Depuis quand les animaux supérieurs s'accouplent-ils pour procréer? La découverte de fossiles de poissons archaïques, vieux de 375 millions d'années, offre une réponse à la question et éclaire notre propre évolution.

**74** **BIOLOGIE ANIMALE****Le serpent à tentacules,
un tueur né***Kenneth Catania*

Le serpent à tentacules utilise ses appendices pour repérer sa proie et d'ingénieuses stratégies pour la capturer. Et ce, dès la naissance: son comportement de chasse est ancré dans ses gènes.

Regards**78****HISTOIRE DES SCIENCES****La controverse du gaz
d'éclairage***Jean-Baptiste Fressoz*

En 1823, la construction d'une immense usine à gaz rue du Faubourg Poissonnière, à Paris, déclenche une si vaste polémique que le gouvernement demande une expertise à l'Académie des sciences...

82**LOGIQUE & CALCUL****Le défi des faibles complexités***Jean-Paul Delahaye*

Comme les très petites durées ou longueurs, les faibles complexités sont délicates à estimer. Paradoxalement, leur évaluation exige des calculs colossaux.

88**ART & SCIENCE****Le ciel se couvre chez Murillo***Loïc Mangin***90****IDÉES DE PHYSIQUE****Scintillations estivales***Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik***93****SCIENCE & GASTRONOMIE****Le temps des cerises***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: © Shutterstock/Gualtiero Boffi

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

→ LA RARE EXPERTISE DU CAPITAINE HADDOCK

Il est dommage que les injures soient, comme tous les mots, dotées d'un sens. Quand vous êtes furieux contre quelqu'un, c'est une limitation, puisque cela les empêche de jouer le rôle que vous en attendez : dire tout le mal qu'il y a à dire de cet individu pire que tout ce qu'on peut dire ! L'injure idéale aurait une puissance de destruction absolue. Elle frapperait dans toutes les directions, comme une bombe atomique, et, dans chaque direction, elle serait d'une précision aussi dévastatrice qu'un rayon laser bien ajusté. Hélas, en l'état actuel du langage, les injures ont toujours un sens soit trop étroit, soit trop vague, si bien qu'aucune ne parvient à exprimer ce que vous ressentez. Voilà pourquoi, quand ça chauffe, il vous reste pour seule ressource, hélas plus théorique que pratique, de traiter l'autre de tous les noms.



→ LA CRITIQUE N'EST PAS SI AISÉE !

Limites de la critique rationnelle. Le malade qui, souffrant le martyre malgré les efforts des médecins, se décide à consulter un charlatan agit de façon rationnelle : tout ce dont il espère la fin de ses souffrances est justifié. Le charlatan agit aussi de façon rationnelle : tout ce qui peut l'enrichir est bon.

La seule critique possible repose sur la morale, non sur la raison. Et encore,

elle ne peut s'appliquer qu'au charlatan. Qualifier d'immorale la conduite d'un malade qui se débat au milieu de grandes souffrances serait déplacé.

Contrairement aux idées reçues, critiquer n'est pas facile.

→ LES ALÉAS DU HASARD

Paradoxe. Les sciences ont fait de grands progrès dans l'étude du hasard. Or rien n'a changé quant au rôle que le hasard tient dans nos vies : surprises et accidents nous bousculent comme ils bousculent les hommes depuis toujours.

C'est que le hasard des sciences est fort différent de celui de la vie courante. Il se situe à l'intérieur d'un cadre fixé, au sein duquel on peut en donner une définition opérante. Cela permet d'aborder des questions comme : dans le cadre des suites de nombres, telle ou telle suite relève-t-elle du hasard ? Dans la vie, le hasard naît au contraire d'un changement de cadre imposé par l'intrusion d'un événement que nul n'attendait. Au moment où je me demande si la suite de nombres relève du hasard, je n'envisage pas le hasard d'une tout autre espèce qui, peut-être, va faire tomber sur mon bureau un avion en perdition et me sortir sans ménagement du cadre approprié à mon étude. Les sciences analysent un hasard apprivoisé, la vie affronte un hasard sauvage.

Quant aux vieux procédés, ils n'ont pas pris une ride. Aujourd'hui comme hier, la pièce lancée en l'air décide de qui engage le match, l'urne contient les sujets d'examen parmi lesquels chaque candidat tire le sien, le loto enrichit l'État en faisant rêver les naïfs. Ces procédés sont d'une curieuse nature intermédiaire. Comme dans la vie courante, ils font changer de cadre, mais, comme en sciences, la situation reste sous contrôle. Ainsi, quand des enfants se disputent un objet, on propose de tirer le vainqueur à la courte paille ; on espère que ce jeu de hasard se substituera à leur querelle et y mettra fin. Cette irruption du hasard est cependant maîtrisée par l'adulte qui tente de ramener le calme.

Le hasard usuel ne pourra relever des sciences que le jour où nous serons à l'abri des imprévus nous forçant à sortir du cadre où nous pensions rester. Inconcevable bouleversement de la condition humaine ! Parions plutôt qu'une part immémoriale d'impondérable demeurera toujours hors d'atteinte de toute science.

« Le Conseil constitutionnel n'a rien laissé au hasard : il est allé jusqu'à tirer au sort l'ordre de passage des candidats » [Gérard Genette, *Bardadrac*, Seuil, 2006, p. 246].

→ MA LIONNE SUPERBE ET GÉNÉREUSE...

On peut s'amuser à trouver chez les animaux un analogue à presque toutes les professions humaines. Musicien : le rossignol. Artiste plasticien : le paon faisant la roue. Ingénieur : le castor construisant un barrage. Pilote : l'oiseau migrateur. Géomètre : l'araignée tissant sa toile. Manipulateur génétique : l'insecte pollinisateur. Spéléologue : la taupe. Ouvrier spécialisé : la fourmi. Agent multiple : le caméléon. Philosophe : la chouette [qui, comme la raison, s'éveille tard]. Quant à s'approprier le bien d'autrui par la force, la ruse ou le parasitisme, ou à prendre le pouvoir dessus, rien d'étonnant à ce que ces procédés constituent l'essence de tant de professions : ils sont omniprésents dans le monde animal.

Le langage familial fait toutefois des distinctions. Il dira volontiers qu'une fourmi traînant sa charge, ou un castor construisant un barrage, travaillent ; il ne le dira pas d'une lionne aux aguets. Pourtant, l'activité de celle-ci s'inscrit dans une organisation



collective et une division des tâches semblable à celle des métiers humains : la lionne ne chasse pas uniquement pour satisfaire son besoin immédiat, mais aussi pour nourrir le mâle et les petits. Seulement voilà. Cette activité n'est pas sans rappeler celle des mères de famille, dont on ne reconnaît pas toujours qu'elles exercent une forme de travail. Machisme, quand tu nous tiens...

→ UNE PALETTE DE SONS

La science actuelle analyse les bruits selon... leur couleur ! Hallucination de sa part ? Non. Il y a une analogie entre ondes sonores et ondes lumineuses. Hélas, la définition de la couleur d'un bruit, fondée sur cette analogie, est trop technique pour éclairer la lanterne des non-scientifiques. Elle ne permet pas de donner toute sa rigueur à l'expression, fréquente en musique, de « couleurs de l'orchestre ».



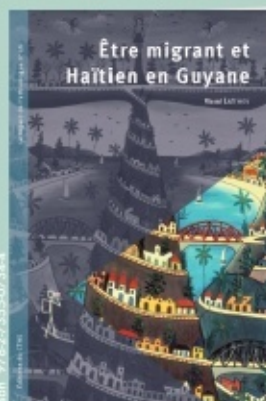
Cependant, point n'est besoin de comprendre la définition pour écouter des exemples sur Internet. Nouvelle déception. Une oreille profane ne voit pas ce qu'il y a de bleu, de rose ou de violet dans les divers grésillements grisâtres, agressifs, disgracieux et désagréables qui sont proposés.

Si on veut en entendre de toutes les couleurs, mieux vaut lire le sonnet « Voyelles » : « A noir, E blanc, I rouge, U vert, O bleu »... Mais Rimbaud, poète, pratiquait le « dérèglement de tous les sens ». La science n'invite pas à se comporter ainsi. Pas étonnant, alors, que sa polychromie sonore soit peu parlante !

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° 26



Être migrant et Haïtien en Guyane
Maud Laëthier
Préface de Marie-José Jolivet

320 pages
ill. noir et blanc
16 x 24 cm
26 €

CTHS Histoire n° 45



La province antiquaire
L'invention de l'histoire locale
en France (1800-1870)
Odile Parsis-Barubé

464 pages
15 x 22 cm
28 €

CTHS Histoire n° 43



Hommes de la vigne et du vin
Sous la direction de Sophie Delbrel
et Bernard Gallinato-Contino

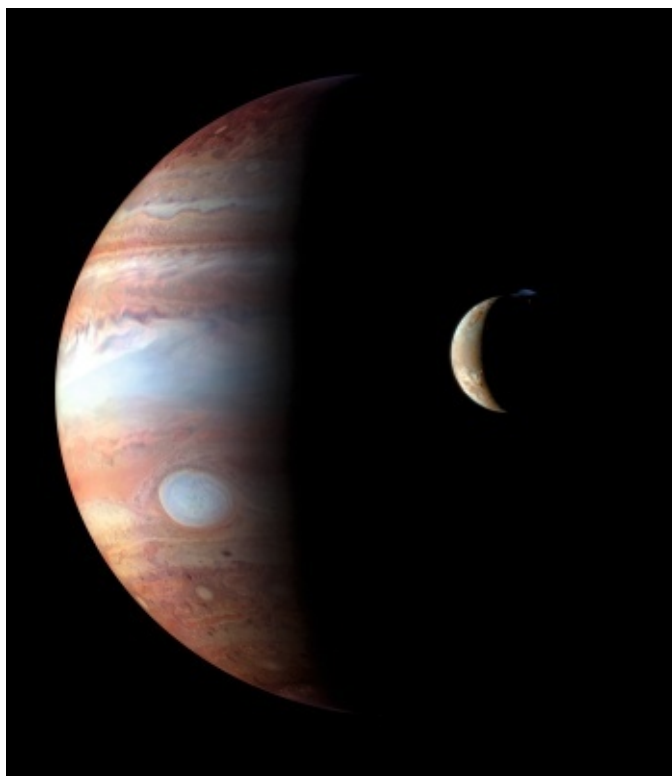
208 pages
ill. noir et blanc
15 x 22 cm
20 €

* ventes@cths.fr * vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr * Distribution SODIS *

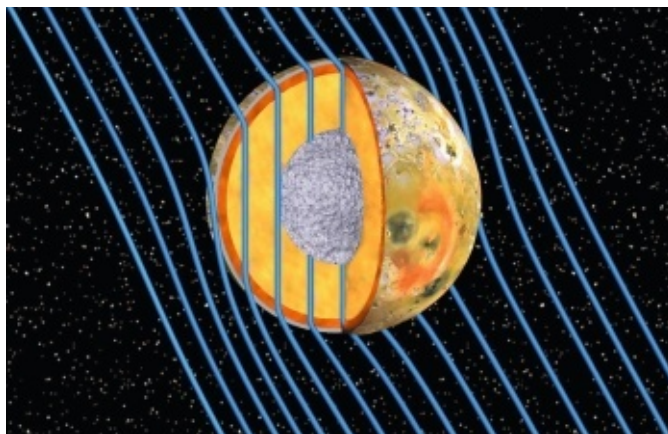
Planétologie

Un océan de magma sous Io

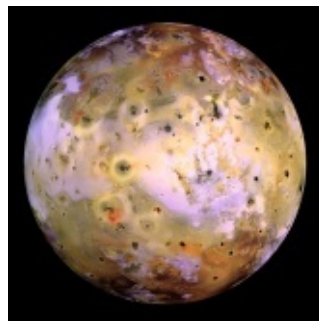
On a enfin trouvé une preuve convaincante de l'existence d'un océan de magma sous la surface de Io, la lune de Jupiter la plus proche de la planète.



VASCOONIS HOPKINS UNIVERSITY APPLIED PHYSICS LABORATORY/SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE/GODDARD SPACE FLIGHT CENTER



VASCOONIS HOPKINS UNIVERSITY APPLIED PHYSICS LABORATORY/SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE/GODDARD SPACE FLIGHT CENTER



VASCOONIS HOPKINS UNIVERSITY APPLIED PHYSICS LABORATORY/SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE/GODDARD SPACE FLIGHT CENTER

Io est, parmi les quatre lunes de Jupiter, la plus proche de la planète gazeuse. Son volcanisme, très actif, résulterait d'un océan de magma partiellement fondu (en orange sur le schéma), situé sous la croûte. Io baigne dans le champ magnétique de Jupiter (lignes bleues) que son magma, conducteur électrique, déforme.

Un océan de magma de plus de 50 kilomètres d'épaisseur se trouve sous la surface de Io et explique l'activité volcanique de cette lune de Jupiter. C'est ce que révèle l'analyse d'anciennes données de la sonde *Galileo*, conduite par Krishan Khurana, de l'Université de Californie à Los Angeles, et ses collègues.

Ces données concernent l'intense champ magnétique de Jupiter, autour duquel *Galileo* s'est mis en orbite en 1995 avant de plonger dans l'atmosphère de la planète gazeuse en 2003. À l'époque, les modèles d'interactions de Io et du champ magnétique de Jupiter n'étaient pas assez développés pour que l'on comprenne certaines caractéristiques de ce champ. La situation n'est aujourd'hui plus la même. De récents travaux en minéralogie ont mon-

tré que les roches dites ultramafiques conduisent le courant électrique lorsqu'elles sont fondues. En effet, les roches ultramafiques sont très pauvres en silice (par définition, moins de 45 pour cent), mais elles peuvent contenir plus de 90 pour cent de minéraux riches en oxyde de magnésium et, surtout, en oxyde de fer conducteur.

Cela a conduit K. Khurana et ses collègues à se demander si les caractéristiques du champ magnétique autour de Io ne pourraient pas être dues à des courants électriques circulant dans des roches ultramafiques plus ou moins fondues sous la surface de Io.

L'hypothèse semble correcte, car des tests ont montré que ces caractéristiques pouvaient être parfaitement reproduites grâce à des roches telles que la lherzo-

lite, qui appartient au groupe ultramafique et que l'on trouve sur Terre au Spitzberg en Norvège.

En réinterprétant les données de *Galileo* à la lumière de cette hypothèse, les chercheurs en ont déduit qu'un océan de magma, fondu à plus de 20 pour cent et mesurant plus de 50 kilomètres d'épaisseur, doit se trouver à 30 ou 50 kilomètres sous la croûte de Io. La température de fusion de ce magma se situerait probablement aux alentours de 1200 °C.

Cette découverte permet enfin d'expliquer d'où vient toute la lave de Io. En effet, cette lune à peine plus grosse que celle de la Terre produit chaque année 100 fois plus de lave que l'ensemble des volcans de notre planète. De plus, alors que les volcans terrestres sont localisés en quelques régions bien définies, ceux de Io sont répartis

partout à sa surface. Autant d'éléments qui trouvent désormais une explication simple.

La Terre et la Lune ont peut-être eu des océans de magma similaires il y a quelques milliards d'années, mais ces deux corps se sont refroidis depuis longtemps. Io offrirait ainsi une image du volcanisme terrestre ou lunaire dans un passé très lointain.

Si un océan de magma a subsisté au sein d'un corps aussi petit que Io, c'est grâce aux effets des marées gravitationnelles de Jupiter qui malaxent en permanence Io. Les marées gravitationnelles produisent une chaleur interne suffisante pour maintenir le magma fondu, et faire de Io le siège d'un volcanisme parmi les plus actifs du Système solaire.

→ Stéphane Fau

Science, en ligne, 12 mai 2011

Biologie animale

L'araignée qui se prend pour Spiderman

A l'instar des araignées, Spiderman produit un fil de soie. Toutefois, si, chez les arachnides, le fil sort de glandes situées au bout de l'abdomen, celui du superhéros sort de l'extrémité de ses membres. La réalité a rattrapé la fiction : Claire Rind, de l'Université de Newcastle, au Royaume-Uni, et ses collègues ont montré que certaines mygales élaborent ce matériau au niveau des tarsi, les extrémités des pattes.

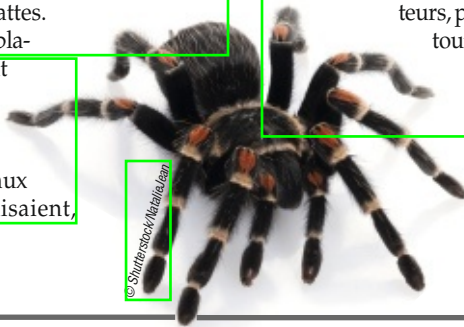
Des arthropodes furent placés dans un terrarium dont le fond était tapissé de lames de verre. Le récipient fut peu à peu incliné, et même secoué : les animaux glissaient puis s'immobilisaient,

retrouvant une adhérence. Des traces de soies furent détectées sur les lames observées au microscope.

Un film a prouvé que la soie retrouvée était bien produite par les tarsi, aucune autre partie du corps n'ayant été en contact avec le support. L'araignée produit cette soie au moment où elle est en danger, lorsqu'elle glisse. Enfin, l'examen de mues d'araignées a révélé de fins « tubules » sécrétés, produisant la soie et répartis sur toute la surface de contact du tarse.

→ Loïc Mangin

F. C. Rind et al., *J. Exp. Biol.*, vol. 214, pp. 1874-1879, 2011



© Shutterstock/italianleg

Brachypelma auratum, une mygale mexicaine.

En bref

SUCRER LES ANTIBIOTIQUES

Ajouter du sucre à des antibiotiques pourrait faciliter leur action, ont montré des biochimistes américains. Certaines bactéries, dites persistantes, survivent au traitement antibiotique en entrant en hibernation, ce qui entraîne des infections chroniques. Chez la souris, cependant, le traitement semble plus efficace en présence de sucre. En stimulant le métabolisme bactérien, le sucre favoriserait l'entrée de l'antibiotique dans les bactéries persistantes, qui seraient alors éliminées.

RECYCLER LE MÉTHANE

Le méthane (CH_4), puissant gaz à effet de serre utilisé aussi pour produire de l'énergie par combustion, a des liaisons carbone-hydrogène très solides. Des chimistes français et espagnols ont réussi à le transformer à température modérée (40°C), en un ester (le propionate d'éthyle) potentiellement valorisable. Pour ce faire, ils ont inséré un carbone, un composé très réactif, dans une liaison du méthane grâce à un catalyseur organométallique particulièrement actif.

THYLACINE : LOUP OU TIGRE ?

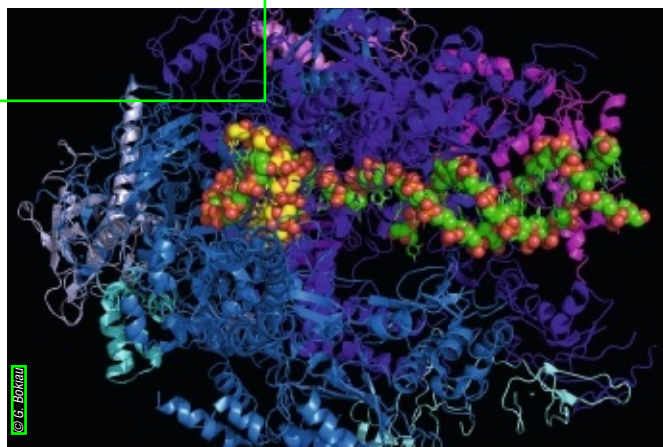
Le 7 septembre 1936 disparaissait le dernier thylacine, espèce de mammifère marsupial carnivore au pelage tigré sur la croupe, plus connu sous le nom de loup marsupial ou tigre de Tasmanie. De fait, on ignorait si son comportement le rapprochait des félins ou des canidés. L'étude des os de l'animal, et notamment des articulations du coude, a montré qu'il était plus un chasseur à l'affût (solitaire) qu'un poursuiveur, chassant en meutes. L'expression tigre de Tasmanie convient donc mieux.

Génétique

ADN-ARN : une copie infidèle

Le phénomène est décrit dans tous les manuels : l'ADN est transcrit en un ARN lui-même traduit en une protéine. La clef de voûte de cette chaîne est la fidélité. D'abord, à une séquence d'ADN (constituée des quatre nucléotides A, T, C et G) correspond une unique séquence d'ARN grâce aux règles de complémentarité (G-C, A-U, le U remplaçant le T). Ensuite, chaque triplet de l'ARN (trois lettres consécutives) détermine un acide aminé de la protéine. Le schéma s'est enrichi à mesure des découvertes, mais le principe est resté le même. Vivian Cheung, de l'Université de Pennsylvanie, à Philadelphie, et ses collègues viennent de le remettre en cause en montrant que, pour de nombreux gènes, la transcription de l'ADN en ARN n'est pas si fidèle.

Les biologistes ont comparé les séquences d'ADN et d'ARN correspondants dans des lymphocytes B (des globules blancs) de 27 individus et ont identifié plus de 10 000 sites où les deux molécules diffèrent, environ 40 pour cent des gènes ayant au moins une erreur de transcription.



Le processus de transcription qui, à l'aide de l'enzyme ARN-polymérase (structures en bleu et violet), associe aux nucléotides A, T, C et G de l'ADN (en vert) les nucléotides U, A, G et C de l'ARN (en jaune), ne produit pas une copie fidèle.

Des résultats identiques ont été obtenus avec des cellules de types différents (peau, cerveau...), aussi bien d'enfants que d'adultes. Le phénomène n'est donc pas propre aux lymphocytes B. Autre particularité, une différence de transcription en un site se traduit toujours par le même remplacement. Selon V. Cheung, une telle constance trahit une sorte de code où le hasard n'a pas sa place, mais

il reste à le déchiffrer. Ces résultats mettent en évidence un nouveau niveau de diversité génétique. Ils obligent à s'éloigner du « tout ADN », notamment pour les projets de séquençage, et attirent l'attention sur les ARN transcrits (on parle de transcriptome). Ils dissimulent peut-être des pistes pour des découvertes importantes.

→ L. M.

M. Li et al., *Science*, en ligne, 19 mai 2011

Paléontologie

Crocodiles transatlantiques

Le genre *Crocodylus*, de la famille des crocodylides, contient 13 espèces. Selon Evon Hekkala, de l'Université Fordham dans l'État de New York, l'ancêtre des crocodiles américains a traversé l'Atlantique. Avec ses collègues, elle a séquencé l'ADN mitochondrial de 11 espèces de crocodiles et a dressé l'arbre phylogénétique le plus complet du genre *Crocodylus*. Il en ressort que le premier ancêtre commun du crocodile du Nil et des quatre espèces américaines de crocodiles a vécu il y a quelque sept millions d'années. Seulement 3 800 kilomètres séparaient alors l'Afrique du continent américain ; une telle distance était franchissable par des crocodylides tolérants au sel et capables de se passer de nourriture pendant six mois, comme le sont les crocodiles actuels. Les femelles des crocodylides conservant en elles du sperme viable pendant plusieurs mois, l'idée que certaines de leurs ancêtres aient pu se perdre en mer face à l'Afrique, être emportées par les courants vers l'Amérique et y pondre est plausible.

→ François Savatier

Molecular Phylogenetics and Evolution, vol. 60(1), pp. 183-191, juillet 2011



Le crocodile américain (*Crocodylus acutus*).

Pharmacologie

Cyberprotéines antigrippe

Le vaccin universel contre le virus de la grippe n'existe pas, notamment parce que les souches du virus changent chaque année. L'objectif des scientifiques est de trouver une molécule unique capable de stopper n'importe quel virus. Sarel Fleishman, de l'Université de Washington à Seattle, et ses collègues ont développé une méthode informatique originale pour obtenir deux protéines antigrippe universelles. La surface des virus de la grippe comporte des protéines nommées hémagglutinines qui permettent aux virus d'infecter les cellules. Ces protéines présentent une région très conservée entre les différentes souches, mais peu accessible. En utilisant des programmes développés par une vingtaine d'équipes dans le monde, les biophysiciens ont créé par ordinateur des protéines complètes capables d'interagir fortement et spécifiquement avec ce domaine conservé des hémagglutinines. Puis ils ont fait produire ces protéines par des levures et en ont trouvé deux qui présentent une forte affinité pour n'importe quel virus de la grippe. La prochaine étape consistera à produire ces protéines en grande quantité et à vérifier leur efficacité.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

S. J. Fleishman et al., Science, en ligne, 12 mai 2011

Astronomie

La Voie lactée a le bras long

Le disque de notre galaxie est plus symétrique qu'on ne le pensait, d'après la découverte de Thomas Dame et Patrick Thaddeus, astrophysiciens à Harvard, aux États-Unis.

De l'avis de la plupart des astronomes, la Voie lactée est une galaxie spirale barrée comportant deux bras principaux, celui de Persée et celui de l'Écu-Croix (voir l'illustration ci-dessous). Les autres bras seraient des structures mineures, faites surtout de gaz. Th. Dame et P. Thaddeus ont découvert ce qui est probablement un prolongement du bras de l'Écu-Croix, bras qui entoure désormais presque toute notre galaxie, depuis sa barre centrale d'étoiles jusqu'à son bord. Le bras de l'Écu-Croix apparaît ainsi comme le symétrique du bras de Persée, ce qui confère à la Voie lactée une structure plus simple et plus symétrique qu'on ne le croyait.

Le nouveau bras ou morceau de bras serait long d'environ 60 000 années-lumière, alors que le diamètre de la Voie lactée en fait 100 000. Pourquoi n'avait-il pas été remarqué auparavant ? Probablement parce qu'il est courbé : il se trouve en effet légèrement au-dessus du disque voilé de notre galaxie. Il aurait ainsi

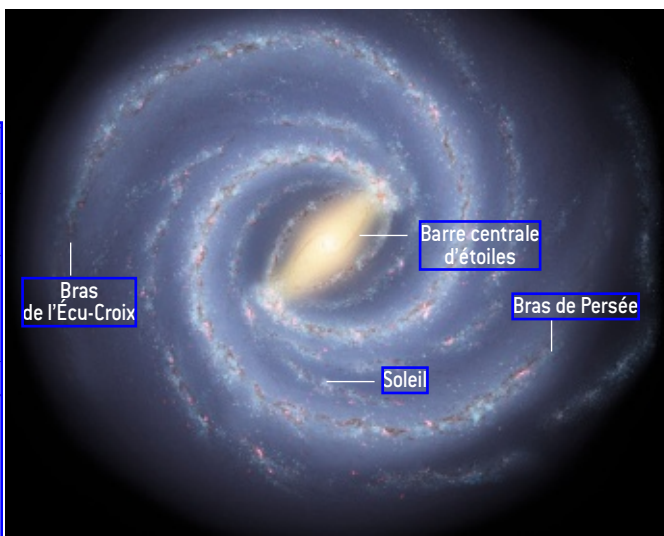
échappé à l'attention des astronomes, qui l'avaient déjà observé sans l'identifier.

Les deux astrophysiciens l'ont découvert en tentant de suivre les bords du bras de l'Écu-Croix. À leur grande surprise, ils ont détecté une structure surgissant à un angle de trois degrés au-dessus du plan galactique, dans le prolongement linéaire de l'Écu-Croix. Afin de s'assurer de leur découverte, ils ont examiné les données préexistantes d'une cartographie de l'hydrogène neutre dans notre galaxie et ses alentours. Cela leur a permis de tracer l'aspect du bras tel qu'il est observé à la longueur d'onde de 21 centimètres.

Puis ils ont eux-mêmes réalisé des observations dans le domaine millimétrique pour détecter la présence de monoxyde de carbone (CO) à une dizaine d'endroits le long du nouveau bras. Cette présence est révélatrice de nuages denses d'hydrogène moléculaire où se forment les étoiles, nuages qui constituent les meilleurs traceurs des bras spiraux. Ils démontrent ainsi que le nouveau bras n'est pas une illusion.

→ S. F.

Astrophysics J. Letters, sous presse, 2011, <http://arxiv.org/abs/1105.2523>



Vue d'artiste de la Voie lactée, qui intègre la découverte du prolongement du bras de l'Écu-Croix.

Génétique

L'arrêt du tabac : une question de gène ?

La nicotine stimule le circuit cérébral de la récompense et le modifie durablement, de sorte qu'il est souvent difficile de s'arrêter de fumer. Riju Ray, de l'Université de Pennsylvanie à Philadelphie, et ses collègues suggèrent aujourd'hui que les personnes portant une version particulière du gène codant le récepteur opioïde *mu* arrêtent de fumer plus facilement.

Les récepteurs opioïdes *mu* sont présents dans les aires cérébrales du système de la récompense (le cortex cingulaire, l'amygdale, le noyau caudé, l'aire tegmentale ventrale, le noyau accumbens et le thalamus). Ce système met en œuvre différents neurotransmetteurs, notamment la dopamine – la molécule du plaisir – libérée par

les neurones de l'aire tegmentale ventrale qui se projettent dans le noyau accumbens.

En se fixant sur ses récepteurs dits nicotiniques, la nicotine entraîne la libération de dopamine dans ce noyau. Il s'ensuit une libération d'opioïdes endogènes (des substances analogues aux opiacés et naturellement synthétisées dans le cerveau) dans l'aire tegmentale ventrale, ce qui active en retour les neurones libérant de la dopamine. Ainsi, le système des opioïdes participe à l'addiction en renforçant les effets de la nicotine.

Les neurobiologistes ont étudié le gène codant le récepteur opioïde *mu* chez 22 fumeurs. Il en existe deux versions : l'allèle sauvage, le plus répandu, et un autre allèle, plus rare, nommé allèle G,



© Shutterstock/SummaPhoto

qui code un récepteur presque identique (un seul acide aminé diffère). R. Ray et ses collègues ont constaté que les fumeurs chez qui l'allèle sauvage s'exprime fixent davantage d'opioïdes dans l'amygdale, le thalamus et le cortex cingulaire, comparés aux personnes ayant l'allèle G.

Après une nuit d'abstinence, les fumeurs devaient exprimer le

plaisir ressenti en fumant une cigarette avec ou sans nicotine. Les fumeurs dotés de l'allèle G éprouvent à peu près le même plaisir avec les deux types de cigarettes. L'allèle G serait donc associé à une moindre dépendance à la nicotine et à un risque moins important de rechute.

→ B. S.-L.

R. Ray et al., PNAS, en ligne, 16 mai 2011

16 MINUTES : c'est la durée pendant laquelle les physiciens du CERN piègent des atomes d'antihydrogène ; bien assez pour les comparer de près à l'hydrogène...

Sciences et sport

Tennis : Roger Federer est sur le déclin

Le joueur de tennis suisse Roger Federer a été battu par l'Espagnol Rafael Nadal en finale de Roland Garros. Auparavant, il n'avait atteint aucune des finales des tournois du Grand Chelem depuis un an. Pourra-t-il redevenir numéro un ? Probablement pas. Marion Guillaume et ses collègues ont étudié la carrière des joueurs de tennis professionnels : pour la plupart d'entre eux, l'évolution des performances avec l'âge suit une parabole, avec un déclin inévitable.

Les chercheurs de l'Institut de recherche biomédicale et d'épidémiologie du sport et de l'Institut national du sport, de l'expertise et de la performance ont ana-

lysé les résultats sportifs de tous les joueurs ayant figuré parmi les dix meilleurs des classements WTA et ATP entre 1968 et 2009.

Ils ont évalué la proportion annuelle de victoires, à savoir le rapport annuel de victoires sur le total de matchs disputés par le joueur à un âge donné.

Ils ont montré que la durée moyenne de carrière d'un joueur de tennis est de 16 ans. L'âge de la retraite est avancé pour les joueurs ayant commencé après 1985, mais la durée des carrières reste la même, avec en moyenne 529 matchs joués pour les femmes et 674 pour les hommes. L'évolution des performances présente deux phases : une progression

vers le succès et, inévitablement, une lente diminution des capacités jusqu'à l'arrêt de la carrière. En outre, selon M. Guillaume et ses collègues, l'aire sous la courbe correspond au « capital tennis » du joueur, paramètre directement lié à la durée de sa carrière, à l'âge du premier match et à son pic de performance.

Dans ce modèle, Stéphanie Graf, André Agassi, Chris Evert et Martina Navratilova, qui ont eu des carrières exceptionnelles, avaient un capital tennis plus élevé que beaucoup d'autres champions.

→ B. S.-L.

Medicine & Science in Sports & Exercise, en ligne, mai 2011



© Shutterstock/Lucy Clark

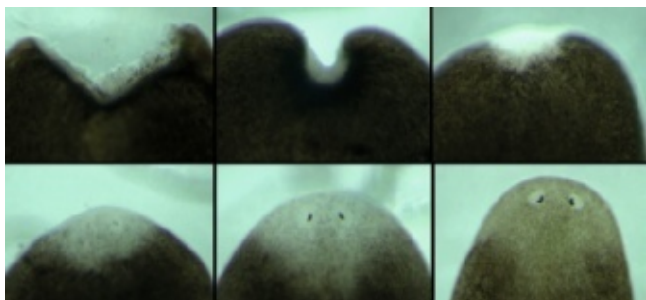
A presque 30 ans, Roger Federer est probablement en fin de carrière et ses performances commencent à décliner.

Biologie cellulaire

Régénéré avec une cellule

Une cellule souche adulte suffit pour régénérer la planaire *Schmidtea mediterranea* – un ver marin plat long de deux centimètres. C'est ce qu'ont montré des biologistes de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), aux États-Unis. On savait que la régénération est l'œuvre d'une population particulière de cellules, les néoblastes. Disséminées dans l'organisme, ces cellules souches adultes migrent vers les blessures où, en se différenciant, elles produisent les types cellulaires nécessaires à la reconstruction de l'organisme. Restait une question : chaque néoblaste est-il programmé pour se différencier en un type cellulaire donné ou un néoblaste peut-il à lui seul régénérer tous les types cellulaires ? Pour le déterminer, Daniel Wagner et ses collègues ont injecté un néoblaste issu d'une planaire dans une autre planaire dont ils avaient endommagé les néoblastes par irradiation, au point qu'elle ne pouvait plus se régénérer. En sept semaines, le néoblaste a régénéré l'animal : toutes les cellules de l'hôte ont été remplacées par des cellules différenciées issues du néoblaste étranger. Ce comportement inattendu de cellules souches adultes offre un nouveau modèle pour l'étude *in vivo* des cellules souches pluripotentes, ces cellules capables de se différencier en plusieurs types cellulaires, que l'on cherche à utiliser en médecine régénérative.

→ Marie-Neige Cordonnier

D. Wagner et al., *Science*, vol. 332, pp. 811-816, 2011

PARADISE LAB, UNIVERSITÉ DE BÈRNE

Régénération de la tête coupée d'une planaire *Schmidtea mediterranea*.

Astronomie

Une grosse étoile esseulée

Dans la nébuleuse de la Tarentule, située dans le Grand Nuage de Magellan, une galaxie voisine de la nôtre, l'étoile VFTS 682 se révèle être un astre d'exception. Grâce au télescope européen VLT, au Chili, une équipe internationale d'astronomes a établi que cette étoile est trois millions de fois plus brillante que le Soleil, 150 fois plus massive, très chaude en surface (environ 50 000 degrés) et, surtout, qu'elle est isolée, puisqu'elle se trouve à au moins 95 années-lumière de l'amas dense d'étoiles le plus proche, R136. D'où vient cette étoile ? On l'ignore, mais les astronomes voient deux possibilités. Soit elle s'est formée sur place, auquel cas la théorie de la formation des étoiles massives doit être revue ; soit l'étoile s'est lentement échappée de l'amas R136 où elle serait née, ce qui en ferait l'étoile la plus massive de ce type et représenterait un défi pour les scénarios d'éjection d'étoiles de leur amas.

→ Maurice Mashaal

I. M. Bestenlehner et al., *Astronomy & Astrophysics*, vol. 530, L14, 2011

Préhistoire

Des menhirs couchés

Deux menhirs trouvés en mai dernier par l'INRAP dans la cour d'une ferme gauloise, au lieu-dit des Basses Coutures à Champagne-sur-Oise, intriguent les archéologues, parce qu'ils ont été abattus volontairement.

La première explication qui vient à l'esprit est qu'Obélix les a livrés, mais a oublié de les dresser. Boutade mise à part, un rapprochement entre les Gaulois et les menhirs est absurde pour les archéologues. En effet, il y a davantage de siècles entre l'époque gauloise et celle de l'érection des menhirs, qu'entre nous et les Gaulois !

Ce sont les sociétés très hiérarchisées du Néolithique moyen qui ont érigé des monuments mégalithiques, dont les menhirs. Ceux des Basses Coutures ont été installés quelque 3 500 ans avant notre ère. Longs de deux mètres pour une largeur d'environ 0,8 mètre, ils ne sont pas de la même pierre. L'un est en grès et l'autre en calcaire.

Tous deux ont été mis en forme ; celui en calcaire a été taillé, tandis que le menhir en grès a été piqueté. Pour quelle raison ? Il est possible que l'on ait cherché à leur donner une apparence quelque peu humaine, pour garder la mémoire de personnages notables. Plus concrètement, ce qui intrigue les archéologues, c'est qu'ils ont été couchés et enterrés volontairement, une situation déjà rencontrée.

À Belz, dans le Morbihan, l'équipe de Stéphan Hinguant de l'INRAP a en effet découvert tout un monument mégalithique à base de menhirs, qui ont eux aussi tous été renversés et enfouis. Les datations font remonter l'érection du monument à plus de 5 000 ans avant notre ère. Quant au renversement de ces pierres, il est antérieur au III^e millénaire avant notre ère, puisque les archéologues ont pu identifier un niveau datant de cette époque au-dessus des blocs déjà couchés.

Ainsi, les menhirs de Belz ont été couchés et enfouis peut-être dès le Néolithique moyen ou durant le Néolithique final, quelque 3 000 ans avant notre ère. L'ont-ils été parce que, bien après la perte de tout souvenir de leur signification originelle, ils étaient encore chargés d'une valeur symbolique à la fin du Néolithique, comme les menhirs le sont encore aujourd'hui ?

À Champagne-sur-Oise, la même interprétation est possible, mais la période d'enfouissement des deux menhirs n'a pas été établie avec certitude. Le fait que des blocs de la taille de moellons aient été trouvés à côté des deux menhirs suggère que d'autres menhirs ont été exploités par des carriers opportunistes. Les monuments auraient donc été couchés pour être débités facilement. Quand ? Le clou gaulois découvert entre les deux menhirs suggère que ce fut à l'époque gauloise.

→ F.S.



VFTS 682/INRAP

Les deux menhirs de Champagne-sur-Oise.

★ musée du quai Branly

LÀ OÙ DIALOGUENT LES CULTURES



MAYA

DE L'AUBE AU CREPUSCULE

COLLECTIONS NATIONALES DU GUATEMALA

www.quaibranly.fr

Avec le mécénat de PERENCO ★



Exposition
21/06/11 - 02/10/11

euronews metre GRANDS REPORTAGES Le Point Europe 1

SCIENCE T

Fnac 0 892 684 694 (0,34€/minute) www.fnac.com - Ticketnet 0 892 390 100 (0,34€/minute) www.ticketnet.fr
Mosaïque de coquillage, Topoxte, Petén, période classique tardive, Museo Nacional de Arqueología y Etnología de Guatemala © Ministerio de Cultura y Deportes de Guatemala

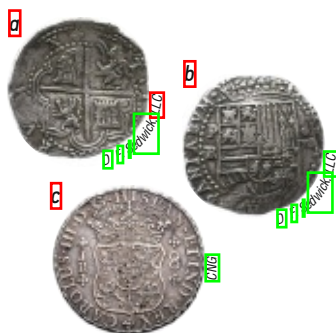
En bref

UN ENSEIGNANT EFFICACE

Quelle méthode d'enseignement est la plus efficace : le cours magistral dans un immense amphithéâtre, où un professeur de renom expose son cours à des étudiants, ou le cours « pratique et dynamique » où un jeune postdoctorant, peu expérimenté, pose des questions aux étudiants, discute avec eux des problèmes et réalise des ateliers pratiques ? Le second, confirment Louis Deslauriers et ses collègues, de l'Université *British Columbia* à Vancouver. Les étudiants sont alors plus motivés et plus assidus en cours.

GÉOMÉTRIE INTUITIVE

La géométrie plane serait intuitive : même des Indiens isolés de l'Amazonie savent ce que sont des droites parallèles et ont une bonne estimation de la somme des angles d'un triangle. Une équipe franco-américaine l'a montré en comparant les résultats de 22 adultes et 8 enfants mundurucus à ceux d'individus américains et français ayant des notions de géométrie. Cette aptitude n'apparaîtrait que vers l'âge de six ou sept ans. Est-elle innée ou acquise lorsque l'enfant s'approprie l'espace ?



Pièces d'argent de huit reales frappées à Potosi, en Bolivie, sous le règne de Philippe II, au XVI^e siècle (a et b) et à la fin du XVIII^e siècle (c et d).

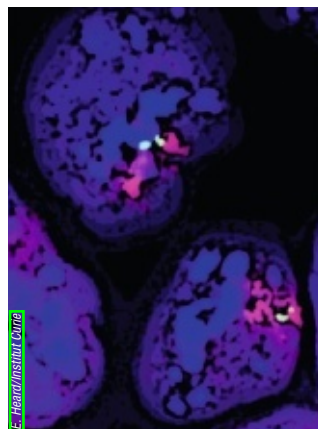
Génétique

La danse des chromosomes X

Chez la plupart des mammifères, les deux chromosomes sexuels des mâles, X et Y, ne se ressemblent pas, le chromosome Y étant bien plus petit que le chromosome X. Pourtant, les cellules des mâles ne souffrent pas de l'absence d'un second chromosome X. Pourquoi ? Parce que les cellules des femelles fonctionnent aussi avec un seul chromosome X : l'autre est inactivé. L'équipe d'Edith Heard, de l'Institut Curie, du CNRS et de l'INSERM, a précisé le mécanisme de cette inactivation.

L'extinction d'un chromosome X a lieu très tôt lors du développement et se conserve sur des centaines de divisions cellulaires. Dans le « centre d'inactivation » d'un des deux chromosomes X (au hasard), un gène majeur de l'inactivation, nommé *Xist*, s'exprime. Il commande la synthèse d'un ARN *Xist* non codant (il ne produit pas de protéine) qui recouvre l'ensemble du chromosome X dont il

est issu. Cet ARN empêche ainsi les gènes de ce chromosome de s'exprimer. Mais un autre ARN non codant, *Tsix* (un transcrit anti-sens de *Xist*), peut à son tour bloquer la production de *Xist* ; un phéno-



Dans le noyau (en bleu) de cellules souches de souris en cours de différenciation, l'un des deux chromosomes X (en bleu vert) est éteint par la surexpression d'un ARN non codant nommé *Xist* (en rose).

mène d'opposition complexe entre ces deux ARN non codants impose l'extinction de l'un ou l'autre des deux chromosomes X.

E. Heard et ses collègues ont pour la première fois observé en temps réel la dynamique spatio-temporelle d'extinction du chromosome X dans des cellules souches embryonnaires de souris. Ils ont assisté à un ballet de chromosomes : ils entrent en contact en des régions précises, notamment au niveau des centres d'inactivation. Au début de la différenciation, les régions portant le gène *Tsix* restent accolées pendant 45 minutes, de sorte que l'un des deux gènes *Tsix* s'éteint. Cela permettrait l'expression et l'accumulation de l'ARN non codant *Xist* sur le chromosome portant le gène actif. Ce contact prolongé constituerait le début du processus qui détermine lequel des chromosomes X est éteint.

→ B. S.-L.

O. Masui et al., *Cell*, vol. 145(3), pp. 447-458, 2011

Archéologie

L'argent espagnol d'Europe et d'Amérique

Entre 1505 et 1650, les prix ont été multipliés par six en Europe occidentale. Cette « révolution des prix » a été attribuée à l'apport de l'argent des Amériques dans la masse monétaire européenne. Pour confirmer ou infirmer cette hypothèse, Anne-Marie Desauty, à l'École normale supérieure de Lyon, et ses collègues ont étudié les compositions isotopiques en plomb, cuivre et argent de 91 monnaies d'argent antérieures et postérieures à la découverte des Amériques.

Les résultats montrent d'abord que les pièces espagnoles européennes du XVI^e et du début

du XVII^e siècle n'ont pas été frappées à partir de métal américain. Or on estime qu'à la fin du XVI^e siècle et au début du XVII^e, environ 200 tonnes d'argent américain arrivaient chaque année à Séville, ce qui est considérable. Mais le royaume d'Espagne le consommait immédiatement dans sa lutte pour maintenir son empire européen (Italie, Autriche, Bourgogne, Pays-Bas) contre la France et l'Angleterre, étendre son empire colonial (Philippines), contrer la domination turque en Méditerranée, etc.

C'est seulement après que le traité d'Utrecht, en 1713, consacre

le démembrement de l'Empire espagnol et la soumission de l'Espagne devenue bourbonne, que le métal américain reste enfin dans la péninsule. Les données isotopiques montrent qu'il est alors surtout d'origine mexicaine. L'argent des Amériques a ainsi été essentiellement consommé en guerres et en manœuvres politiques. Mais il aurait eu une influence indirecte sur la révolution des prix en Espagne, via son utilisation dans toute l'Europe. Les chemins de l'histoire ne sont décidément pas simples.

→ F. S.

A.-M. Desauty et al., *PNAS*, vol. 108, pp. 9002-9007, 2011

Biophysique

Nager dans de l'élastique

Des micro-organismes qui nagent dans un fluide viscoélastique ? La situation est fréquente : micro-organismes vivant dans la boue ou les fluides intestinaux, spermatozoïdes évoluant dans le liquide séminal, etc. Pourtant, les études expérimentales ont été rares jusqu'ici. Or Xiaoning Shen et Paulo Arratia, à l'Université de Pennsylvanie, viennent d'étudier les effets de l'élasticité du fluide sur la nage du ver nématode *Caenorhabditis elegans*, un organisme modèle pour les biologistes, qui fait environ un millimètre de long. Ils ont observé que l'élasticité du liquide ralentit le mouvement des vers. Leur vitesse décroît avec l'élasticité, le ralentissement pouvant atteindre 35 pour cent de la vitesse atteinte dans un fluide ordinaire comme l'eau. Ces résultats sont compatibles avec certaines études théoriques. Mais les recherches n'ont pas jusqu'ici abouti à une vision claire des mécanismes de propulsion dans un fluide viscoélastique. Il se pourrait ainsi que certains types de nage soient au contraire facilités, ce que de futures expériences devront déterminer.

→ M. M.

X. N. Shen et P. E. Arratia, *Physical Review Letters*, vol. 106, 208101, 2011

Environnement

Pollution isocyanique

L'acide isocyanique (HCNO) est l'un de ces polluants présents dans l'atmosphère dont on ignore les concentrations précises. James Roberts et ses collègues, à Boulder dans le Colorado, se sont penchés sur la question et tirent un signal d'alarme : l'acide est présent en quantité suffisamment importante dans l'atmosphère pour avoir des conséquences néfastes sur la santé.

Les chercheurs ont montré que la concentration atmosphérique de cet acide, à Los Angeles et à Boulder, villes étudiées à titre d'exemples, atteint 0,2 partie par milliard en volume. Or on sait qu'au-delà de une partie par milliard, des risques pèsent sur la santé. Ils ont en outre confirmé que l'acide isocyanique est libéré en quantités importantes avec la fumée de cigarettes, la combustion industrielle, le chauffage, les feux de forêt et même les gaz d'échappement des véhicules. Plusieurs études ont montré que l'acide isocyanique peut modifier certaines protéines dans l'organisme et accroît le risque de diverses maladies telles que la cataracte.

→ B. S.-L.

J. Roberts et al., *PNAS*, en ligne, 16 mai 2011

Biologie animale

De la royalactine pour régner

Notre alimentation influe sur notre vie. C'est particulièrement vrai chez les abeilles où la nourriture fait d'une larve soit une ouvrière pour la plupart, soit une reine pour les « élues ». L'aliment qui fait la différence est la gelée royale : la larve à qui les nourrices en donnent plus longtemps qu'aux autres devient reine et ce, alors que toutes les abeilles ont le même patrimoine génétique. Maski Kamakura, de l'Université de Toyama, à Imizu, au Japon, a découvert l'ingrédient qui décide d'un destin royal.

Une première série d'expériences a consisté à étudier l'évolution de la gelée en fonction du temps : au bout de 30 jours, à une température de 30 °C, la mixture perdait tout pouvoir sur le devenir d'une larve. L'analyse de la gelée à différentes étapes du processus de dégradation a mis en évidence une protéine, qui fut nommée royalactine. Purifiée en laboratoire et testée sur des larves, elle induit les trois modifications observées chez une

reine : un développement accéléré, une augmentation de la masse corporelle et celle du volume des ovaires. Plus étonnant, la royalactine déclenche les mêmes changements chez la mouche du vinaigre, la drosophile !

La royalactine active une enzyme, la kinase p70S6, qui favorise la croissance du corps et l'accélération de son développement, mais aussi la production d'hormone juvénile, un composé qui participe à l'augmentation du volume des ovaires. D'autres expériences ont révélé le rôle du récepteur au facteur de croissance épidermique (EGFR), un récepteur à la surface des cellules, dans le contrôle de ces différentes manifestations. En influant sur l'expression de plusieurs gènes via diverses enzymes, dont la kinase p70S6, ce récepteur est au cœur de nombreuses fonctions cellulaires. La royalactine activerait ce récepteur.

→ L. M.

Nature, vol. 473, pp. 478-483, 2011



Deux larves se développent dans de la gelée royale.

DERNIÈRE minute ...

NOUVELLES SUPERNOVAE

L'intense rayonnement des supernovae provient d'habitude de l'onde de choc dans l'étoile, de la désintégration des éléments synthétisés durant l'explosion, ou de l'interaction des éjectas avec l'hydrogène environnant. Robert Quimby, de l'Institut de technologie de Californie, a identifié six supernovae qui ne peuvent être expliquées par ces mécanismes : dix fois plus

brillantes que les supernovae classiques de types IA, elles ne présentent nulle trace d'hydrogène. Une nouvelle classe d'objets ?

RIDES ET PLIS EN CASCADES

Quand on maintient l'un des bords d'un film de matière souple (par exemple en graphène), la surface développe des plis, comme avec des rideaux. Une équipe internationale de physiciens

a établi que la répartition de ces rides fait apparaître une hiérarchie universelle et autosimilaire, le nombre de plis augmentant comme une puissance de la distance au bord contraint. Des films de graphène aux rideaux, il n'y a qu'un pas...

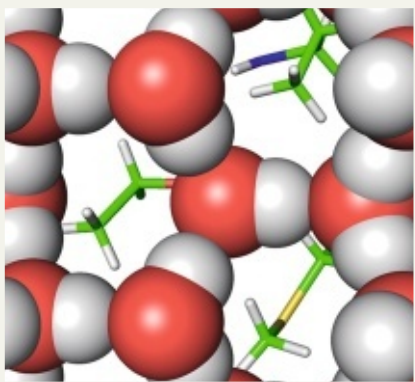
.fr Retrouvez plus d'actualités et toutes les références sur www.pourlascience.fr

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ MÉCANISME D'ACTION

DES PROTÉINES ANTIGEL

Certains poissons vivant dans les eaux très froides des régions polaires de l'Arctique et de l'Antarctique ont dans leurs fluides corporels des protéines antigel qui leur permettent de survivre à des températures négatives. Ces protéines auraient plus de 38 millions d'années (voir *Les poissons à antigels de l'océan Austral*, *Pour la Science*, juin 2004, <http://bit.ly/plsoer320bis>). On sait qu'elles se lient aux germes des cristaux de glace quand ils commencent à se former, empêchant ainsi leur croissance et à terme, la mort de l'organisme. Ces protéines ont la particularité d'avoir beaucoup d'acides aminés hydrophobes en surface (contrairement à la plupart des protéines solubles dans l'eau). Comment agissent-elles ? Des physiciens et biologistes français et argentins ont trouvé pourquoi ces antigels biologiques fixent les germes de glace et non l'eau liquide : ils ont trouvé à la surface de la protéine des agrégats de quatre molécules d'eau qui permettent à la protéine d'être présente dans un fluide aqueux (sans être uniformément hydrophile) et qui imitent la structure de la glace. Pour ce faire, ils ont utilisé la technique de diffraction des neutrons qui permet de déterminer la position des atomes d'hydrogène et donc celle des molécules d'eau à la surface des cristaux de protéines. Ils ont ensuite créé un modèle d'eau glacée fondé sur ces agré-



Des acides aminés (en vert) de la protéine antigel se fixent dans les trous du cristal de glace (sphères rouges et blanches).

→ LES PERSONNES ÂGÉES NE SONT PAS MULTITÂCHES

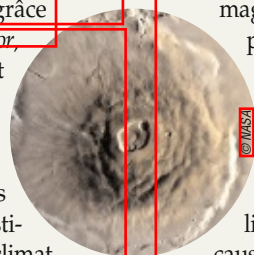
Les hommes et les femmes sont monotâches, bien que leur cerveau soit capable d'analyser deux tâches quasi simultanément... Ce sont les lobes frontaux qui sont impliqués dans l'exécution d'une action maîtrisée et intentionnelle, ayant un but précis, telle que décrire une scène. Chaque lobe frontal peut traiter une tâche en alternance avec l'autre, mais c'est si rapide qu'on a l'impression que les deux tâches sont traitées simultanément (voir *Les hommes sont-ils monotâches ?*, *Pour la Science*, mai 2011, <http://bit.ly/plsoer403>). Le cortex préfrontal joue le rôle de mémoire tampon et met provisoirement en attente l'une des deux tâches pour que l'autre soit traitée. Mais qu'en est-il chez les personnes âgées ? Elles alternent difficilement entre deux tâches, selon Wesley Clapp et ses collègues, de l'Université de Californie à San Francisco (*PNAS*, avril 2011). Les chercheurs ont enregistré l'activité cérébrale de 20 personnes âgées de plus de 60 ans pendant qu'elles devaient décrire un paysage tout en étant (ou non) distraites par une image de visage à identifier. Ils ont montré que les personnes âgées ne réussissent pas aussi bien l'exercice que des personnes plus jeunes quand le « distracteur » – le visage – est présenté. Ce n'est pas parce que les individus de plus de 60 ans prêtent davantage attention au visage, mais parce qu'ils ne sont pas capables de se « reconcentrer » sur le paysage après avoir vu le distracteur. Cela suggère une altération liée à l'âge de la flexibilité cognitive impliquant le cortex préfrontal.

gats pour placer les protéines antigel dans le réseau de glace et comprendre leurs interactions. Les cristaux de glace en formation sont constitués d'anneaux de six molécules d'eau (voir la figure), au centre desquels s'insèrent les agrégats de la protéine, ce qui déstabilise la structure.

→ COMMENT MARS ÉVOLUE

Les images et les données en provenance de Mars sont nombreuses, notamment grâce aux sondes *Mars Global Surveyor*, *Mars Odyssey*, *Mars Express* et *Mars Reconnaissance Orbiter*, en orbite autour de la planète (voir *Les paysages de Mars*, *Pour la Science*, juillet 2003). Les chercheurs tentent de reconstituer l'histoire de l'eau et du climat sur Mars. Mais pour y parvenir, il est nécessaire de comprendre l'évolution thermique de l'intérieur de la planète, qui s'exprime en surface par l'activité volcanique. En effet, un volcan, tel l'*Olympus Mons* (voir le cliché), résulte de la fusion partielle des roches du

manteau et de l'ascension de ces liquides magmatiques à la surface. La composition de ces liquides renseigne sur la température et la profondeur de leur fusion. Grâce aux mesures de *Mars Odyssey*, des chercheurs du CNRS et de l'Université Paul Sabatier à Toulouse ont étudié dans 12 régions volcaniques martiennes l'évolution de plusieurs éléments chimiques (le silicium, le fer et le thorium notamment), sensibles aux conditions de fusion. Ils ont montré qu'avec le temps, la température du manteau a diminué, la lithosphère (formée de la croûte et du manteau supérieur) s'est épaissie et les magmas ont une origine de plus en plus profonde (*Nature*, avril 2011). Ainsi, le refroidissement thermique du manteau martien serait de 30 à 40 °C par milliard d'années. Il est plus lent que sur Terre (70 à 100 °C par milliard d'années), probablement à cause de l'absence de tectonique des plaques sur Mars. Encore un indice révélant la spécificité de la Terre, qui devrait permettre d'en apprendre davantage sur son histoire et les relations entre ses profondeurs et l'évolution de son climat.



→ Bénédicte Salthun-Lassalle

■ POUR LA SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

soit **4 € seulement par numéro** au lieu de 5,20 €

Pour consulter et télécharger
en toute liberté sur www.pourlascience.fr
les 12 prochains numéros
dès leur parution.



Oui, je m'abonne
à *Pour la Science* 100 % numérique
1 an (12 numéros) pour 48 €

Je préfère découvrir toutes
les offres d'abonnement disponibles
en cliquant ici.

POINT DE VUE

Vitamine D : des insuffisances à éliminer

Plus de 40 pour cent des Français manquent de vitamine D. Ce problème de santé publique a pourtant des solutions simples, les ampoules de vitamine étant peu coûteuses.

Laure ESTERLE

La vitamine D joue un rôle essentiel dans la régulation du métabolisme du phosphore et du calcium et dans la qualité des os, surtout chez le nourrisson, au cours de la croissance, mais aussi chez l'adulte et les personnes âgées. Les recommandations quant aux besoins et apports en vitamine D ont permis d'éradiquer le rachitisme, encore fréquent en France il y a environ 40 ans. Pourtant, des efforts restent à faire pour éliminer l'insuffisance en vitamine D.

La source majeure de vitamine D n'est pas alimentaire. Les aliments en contiennent peu, à l'exception des poissons de mer gras. L'alimentation moyenne en France n'apporte que deux à quatre microgrammes par jour de vitamine D, soit 80 à 160 unités internationales par jour (UI/j), alors que les besoins quotidiens des adultes sont estimés à 5-10 microgrammes par jour, soit 200 à 400 UI/j. De plus, certains régimes, végétariens stricts ou macrobiotiques, favorisent une carence.

La source majeure de vitamine D est la vitamine D₃ synthétisée dans les couches profondes de l'épiderme sous l'action des ultraviolets B du Soleil. Aux latitudes comprises entre 40 et 50 degrés, comme en France, l'intensité des ultraviolets n'est suffisante qu'entre juin et octobre, d'où une fluctuation saisonnière importante. De plus, la pollution atmosphérique, la pigmentation de la peau, une faible exposition au soleil (temps couvert, port de vêtements couvrants, usage de crème solaire) peuvent réduire son efficacité.

Le niveau de vitamine D chez un individu doit être estimé non pas à partir des apports alimentaires (environ 30 pour cent

des apports), mais en dosant dans le sang la 25-(OH)D, qui est la forme sous laquelle l'organisme stocke la vitamine.

Des concentrations de 25-(OH)D inférieures à 10 ou 12 nanogrammes par millilitre correspondent à une carence en vitamine D, avec des effets à court et moyen termes connus et nécessitant une prise en charge médicamenteuse : rachitisme et son équivalent chez l'adulte, densités osseuses insuffisantes chez les adolescents ou les personnes âgées, etc.

En revanche, il n'existe pas de consensus concernant le seuil d'« insuffisance », source d'un vif débat aujourd'hui aux États-

LES AUTORITÉS DE SANTÉ
n'ont jamais adopté une position franche concernant la vitamine D chez les adolescents et les adultes.

Unis : nombre de chercheurs et praticiens préconisent une augmentation du seuil d'insuffisance, au-dessous duquel le risque à long terme serait notable et exigerait un apport préventif en vitamine D. Ce seuil varie beaucoup selon les études, avec des concentrations de 25-(OH)D allant de 20-30 nanogrammes par millilitre jusqu'à plus de 80 nanogrammes par millilitre.

Le seuil d'insuffisance est fondé sur des résultats d'études d'associations entre la concentration de 25-(OH)D et le risque de fractures et d'aggravation de la perte osseuse chez les femmes de plus de 55 ans et les hommes de plus de 65 ans, ou le risque de cancer (sein et côlon, essentiellement), ou de maladies auto-immunes telles que

sclérose en plaques, diabète ou polyarthrite rhumatoïde, ou encore de pathologies cardiovasculaires.

Toutefois, ces études d'associations ne permettent pas de savoir si les niveaux de 25-(OH)D inférieurs au seuil augmentent réellement le risque de ces pathologies ou si elles témoignent seulement d'un mauvais état général des personnes à risque. Une autre difficulté d'interprétation est que les concentrations initiales de 25-(OH)D sont très variables d'une étude à l'autre.

En outre, il n'est pas aisé de préciser les liens entre vitamine D et cancers. En effet, de nombreuses femmes ménopausées reçoivent de la vitamine D et du calcium pour prévenir l'ostéoporose, mais on soupçonne que le calcium réduit le risque de certains cancers. Aussi est-il difficile de distinguer le rôle du calcium de celui de la vitamine D, notamment dans les études sur le cancer du sein et les cancers colorectaux chez ces femmes.

Par ailleurs, les seuils d'insuffisance n'ont pas encore été validés par des études d'intervention (plutôt que des études d'observation), où une supplémentation en vitamine D est mise en œuvre de façon contrôlée. Enfin, les effets à long terme d'une concentration élevée de 25-(OH)D restent à étudier.

Pour l'heure, il semble raisonnable de maintenir une concentration de 25-(OH)D supérieure à 20-30 nanogrammes par millilitre, surtout chez les personnes âgées, en raison du risque avéré de fractures, et chez les nourrissons, en raison d'un risque possible de diabète insulino-dépendant.

Pour atteindre ces seuils, notamment chez les sujets à risque de carence, une pro-

phylaxie a été mise en place pour les nourrissons jusqu'à deux ans (1 000-2 000 UI/j ou 100 000 UI quatre fois par an), les femmes enceintes (dose de charge de 100 000 UI au sixième mois) et les personnes âgées (1 000 UI/j ou 100 000 UI quatre fois par an).

On préconise aussi une prise en charge des enfants jusqu'à cinq ans, puis à l'adolescence, afin de préserver une santé osseuse optimale (avec une alimentation riche en calcium ou en produits laitiers), mais aussi chez l'adulte à risque. En effet, en France, si 4,4 pour cent de la population adulte (18-74 ans) sont au-dessous du seuil de carence, 36,7 pour cent sont sous le seuil d'insuffisance (chiffres de 2006) !

Or on constate que, hormis chez les nourrissons, ces recommandations sont peu suivies – alors que dans le cadre d'une alimentation équilibrée, une prise peu

coûteuse (environ 1,80 euro l'ampoule) de deux ou trois ampoules de 100 000 UI par an, avec une prise systématique en début d'hiver, permettrait d'atteindre le seuil souhaitable de vitamine D.

Le rachitisme ayant disparu, la population est aujourd'hui moins sensible aux risques d'une carence en vitamine D. Pour les personnes âgées, cet aspect est ainsi négligé, malgré les nombreux décès dus à une fracture du col du fémur et le coût très élevé de la prise en charge de l'ostéoporose.

De plus, aucune position franche des autorités de santé n'a jamais été prise concernant les adolescents et les adultes. Les médecins généralistes sont ainsi peu sensibilisés à l'importance d'un statut correct en vitamine D et dosent donc rarement la 25-(OH)D de leurs patients, et les

supplémentent encore moins. Par ailleurs, on est submergé de conseils souvent contradictoires sur nos besoins alimentaires (omega 3, cholestérol, vitamines, minéraux, produits laitiers ou non, etc.). Pour la population, il est difficile de s'orienter dans tous ces messages et d'accepter une énième recommandation accompagnée d'une supplémentation, en l'absence d'un message clair des autorités de santé sur les besoins en vitamine D.

Laure ESTERLE, membre de l'unité 986 de l'Inserm, travaille au Centre de référence des maladies rares du métabolisme du calcium et du phosphore, à l'Hôpital Bicêtre Paris Sud.

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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

L'innovation au service des plus pauvres

Les inventions techniques susceptibles de contribuer au développement ne manquent pas. C'est leur mise au service des sociétés qui fait défaut.

Patrick KOHLER

« **L**a science, l'ingénierie, la technologie et l'innovation ne font pas que sous-tendre le développement, elles sont aussi essentielles pour atteindre les huit objectifs du millénaire adoptés en l'an 2000 par l'Assemblée générale de l'ONU, et plus particulièrement l'éradication de la pauvreté extrême et de la faim. [...] L'innovation ne porte pas uniquement sur les hautes technologies ; on doit y inclure les technologies de tous niveaux, en des lieux de toutes sortes – telles les pompes d'approvisionnement en eau et d'irrigation dans des villages africains. »

Prononcées en janvier 2009 par Walter Erdelen à l'occasion d'un atelier organisé

par l'OCDE et l'UNESCO, ces paroles du sous-directeur de l'UNESCO pour les sciences naturelles soulignent le lien étroit entre innovation et développement. Mais cet atelier a aussi montré que l'ingénierie, la science, les technologies et l'innovation sont souvent négligées dans les documents stratégiques de réduction de la pauvreté ou, plus largement, dans les politiques de développement, qu'il soit durable ou non.

Certes, la fracture Nord-Sud ne saurait être endiguée uniquement grâce aux progrès de la science. Mais il existe d'innombrables exemples de familles, communautés ou régions entières qui ont amélioré leur quotidien grâce à l'ingénio-

sité de scientifiques, d'ingénieurs ou de simples techniciens.

Nous n'atteindrons sans doute pas les objectifs du millénaire en 2015, comme le souhaitait Kofi Annan, l'ancien secrétaire général des Nations unies. Et même si c'était le cas, cela ne représenterait que la moitié du chemin vers une éradication de la pauvreté dans le monde. Pourtant, ce ne sont pas l'ingéniosité humaine ni les moyens technologiques qui manquent. C'est au contraire leur mise au service des éléments les plus fragiles de nos sociétés, à plus forte raison dans les pays en développement, qui fait défaut. Cela est d'autant plus paradoxal que les innovations les plus profitables pour le Sud sont



UNE PICOCENTRALE HYDROÉLECTRIQUE installée sur une petite chute d'eau (au premier plan à gauche). Le générateur (voir le cartouche) fournit quelque 400 watts, de quoi améliorer le quotidien de plusieurs foyers.

souvent également les moins élaborées et, par conséquent, les moins coûteuses.

Dans les années 1980, les ingénieurs burkinabés d'une ONG suisse, le Centre écologique Albert Schweitzer (CEAS), ont mis au point un séchoir à fruits et légumes qui pouvait être fabriqué intégralement en Afrique. Cet outil rudimentaire du point de vue technique était capable de valoriser les surplus de production de fruits et légumes tout en allongeant considérablement leur durée de conservation. Restait à faire de cette innovation un outil de développement communautaire.

Pour ce faire, des maîtres formateurs locaux ont formé leurs compatriotes dans l'idée de créer une nouvelle filière commerciale, autonome et génératrice de revenus. Des artisans ayant acquis la technique de fabrication des séchoirs voient désormais leurs carnets de commandes se remplir au fil des ans. Ils approvisionnent des groupements de femmes sécheuses qui se sont constitués dans tout le pays et qui vivent de cette activité économique.

En corollaire, les manguiers, jadis victimes d'une coupe abusive, ont retrouvé de la valeur pour les cultivateurs, lesquels reconstituent à présent des vergers entiers. Enfin, la population burkinabé, dont certaines

franges souffrent aujourd'hui encore de malnutrition, peut acquérir toute l'année des denrées alimentaires locales à la fois saines et goûteuses. Ainsi, des milliers de personnes profitent de l'inventivité de quelques techniciens pragmatiques et clairvoyants qui ont mis leur esprit d'innovation au service d'une démarche intégrée de développement.

Si les techniques simples sont particulièrement bien adaptées pour répondre

IL MANQUE UN RÉPERTOIRE
mondial permettant de ne pas réinventer la roue à chaque fois qu'un même problème se présente à des populations différentes.

aux besoins des populations du Sud, il ne s'agit pas pour autant de négliger le potentiel de technologies plus pointues – à la condition qu'elles restent à la fois abordables, résistantes, fiables et, surtout, qu'elles répondent à des besoins réels sans créer des problèmes nouveaux (dépendances, coûts d'entretien, concurrence déloyale pour les produits locaux par exemple).

Citons l'exemple du *Yellowone Needle Cap* inventé en 2005 par Han Pham, jeune designer danoise. Cette sorte de couvercle en polypropylène se fixe de façon permanente sur une simple canette de soda vide.

Son centre est muni d'une petite membrane qui permet, lorsqu'on y insère une seringue et qu'on la retire brusquement, de capturer son aiguille. Chaque exemplaire de ce dispositif d'une simplicité déconcertante, qui coûte moins d'un euro, a le potentiel d'éviter des milliers de contaminations, notamment par le virus du sida.

Autre exemple : les picocentrales hydroélectriques testées à Madagascar par le CEAS. Il s'agit de miniturbines capables de fournir 400 watts en présence de chutes d'une hauteur de 1,5 mètre seulement. Avec un investissement de 400 euros par site (hors travaux d'aménagement), une douzaine de villages ont pu être reliés pour la première fois à un miniréseau électrique. Chaque turbine peut alimenter l'équivalent de 20 lampes de 15 watts, un chargeur de téléphone portable ainsi qu'un poste de télévision. Ces picocentrales autorisent des économies importantes en combustibles fossiles et stimulent l'environnement socio-économique local.

Il existe ainsi des centaines de technologies à même de soulager le quotidien des populations les plus défavorisées. Malheureusement, les premiers intéressés, de même que les ONG et autres agences de développement, ignorent souvent leur existence. Il manque un répertoire mondial permettant de ne pas réinventer la roue à chaque fois qu'un même problème se présente à des populations différentes. Il existe un certain nombre d'initiatives qui vont dans ce sens, à l'image du *Guide des innovations pour lutter contre la pauvreté* que j'ai rédigé avec Daniel Schneider. Malheureusement, aucune n'est aujourd'hui complète et mondiale : preuve que la question de l'innovation dans la coopération au développement doit être davantage soulignée et promue.

Patrick KOHLER est géographe et a travaillé jusqu'en 2010 au Centre écologique Albert Schweitzer (CEAS), une ONG de coopération technique basée à Neuchâtel, en Suisse.

D. Schneider et P. Kohler, Guide des innovations pour lutter contre la pauvreté, Favre, 2010.

Soif de
connaissances
scientifiques ?

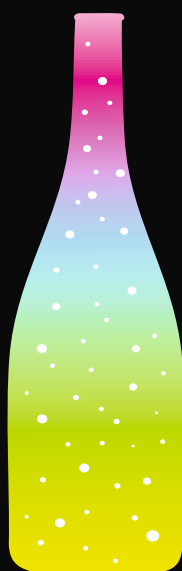
Abonnez-vous 1 an à

■ POUR LA
SCIENCE

12 n^{os} Pour la Science
+ 4 n^{os} Dossier Pour la Science

76€ seulement !
(au lieu de 102,50€)

Votre réduction
- 26 %
par rapport au prix au numéro



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 et reçois **12 numéros de Pour la Science + 4 numéros de Dossier Pour la Science** pendant **1 an** au prix de **76€*** (au lieu de 102,50€, prix de vente au numéro). Je bénéficie également de leur version numérique sur www.pourlascience.fr.

* Offre valable uniquement en France métropolitaine. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : France d'Outre-Mer et Europe 16€ - autres pays 35€.

☐ Je préfère m'abonner uniquement 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. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : France d'Outre-Mer et Europe 12€ - autres pays 25€.

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____

Pays : _____ [él. facultatif] : _____

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

_____ @ _____

Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____

Clé
les 3 chiffres au dos de votre CB

Signature obligatoire _____

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus 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, merci de cocher cette case ☐.

VRAI OU FAUX

Le CO₂ est-il le principal gaz à effet de serre ?

Oui, en ce qui concerne la contribution directe des activités humaines. Mais la vapeur d'eau, le méthane et d'autres gaz participent aussi à l'« échauffement global » de l'atmosphère.

Hervé LE TREUT

Effet de serre, dioxyde de carbone (CO₂), réchauffement climatique : voilà trois formules souvent associées dans les discussions, de sorte que l'on est tenté de croire que le CO₂ est le seul gaz à effet de serre. En fait, l'effet de serre – un chauffage radiatif du sol et des basses couches de l'atmosphère – résulte de l'action de plusieurs gaz. Il favorise la vie sur Terre en participant au réchauffement de la planète, et il intervient ainsi dans un équilibre climatique très précis qu'il modifierait de façon notable s'il augmentait. Comment comparer la part de chaque gaz à l'effet de serre global, et à son augmentation résultant des activités humaines ? Cela passe souvent par la définition d'un « pouvoir d'échauffement global » de chaque gaz, définition qui est plus compliquée qu'il n'y paraît.

Un gaz à effet de serre absorbe le rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère ou la surface terrestre. Cet effet est d'autant plus marqué que les molécules sont plus complexes et qu'elles possèdent des raies d'absorption plus nombreuses. C'est ainsi que l'azote et l'oxygène, aux molécules très simples, n'ont presque aucun effet, et que ce sont la vapeur d'eau (quelques millièmes de la masse atmosphérique) et le CO₂ (dix fois moins) qui sont les gaz à effet de serre les plus absorbants. Les autres gaz à effet de serre naturellement présents dans l'atmosphère, tels le méthane, le protoxyde d'azote ou l'ozone, sont moins abondants.

Comment fonctionne l'effet de serre ? Une part importante du rayonnement solaire traverse l'atmosphère et réchauffe la surface terrestre. Pour maintenir son équilibre ther-

mique, celle-ci émet un rayonnement infrarouge qui lui permet de se refroidir. Ce rayonnement est absorbé par l'atmosphère, qui le réémet vers le sol et l'espace. L'émission atmosphérique vers l'espace est plus faible que ne le serait une émission directe du sol. Ce décalage, lié au fait que la température atmosphérique décroît avec l'altitude, crée l'effet de serre. Ces mécanismes affectent l'importance relative de la vapeur d'eau, dont la teneur diminue avec la température, et du CO₂.

Le calcul de l'impact radiatif des différents gaz à effet de serre est un problème généralement bien compris, car étudié pour de nombreuses applications scientifiques. Des bases de données détaillées répertorient l'ensemble des raies d'absorption de tous les gaz de l'atmosphère. Mais ce problème est difficile à résumer en un indice simple, car l'introduction dans l'atmosphère de l'un de ces gaz engendre un déséquilibre radiatif immédiat (moins de rayonnement infrarouge est émis vers l'espace), suivi d'un rééquilibrage, rapide sur les continents et lent sur les océans. Ce rééquilibrage s'accompagne en plus d'une augmentation de la vapeur d'eau et de changements de la couverture nuageuse.

Il est donc impossible de mesurer directement le rôle des différents gaz. Un diagnostic plus adapté, fondé sur des calculs, est nécessaire. Il est conçu pour répondre à une question précise : si l'on émet à un moment donné une même masse de deux gaz (par exemple du méthane et du CO₂), lequel aura le plus grand effet radiatif cumulé sur une période que l'on choisit le plus souvent égale à 100 ans ? En effet, cette période correspond non seulement à la durée approximative de

persistance du CO₂ dans l'atmosphère (contre dix ans environ pour le méthane et une à deux semaines pour la vapeur d'eau), mais aussi à une échéance de fin de siècle qui focalise l'attention en termes de risques climatiques.

Le méthane : 25 équivalents carbone

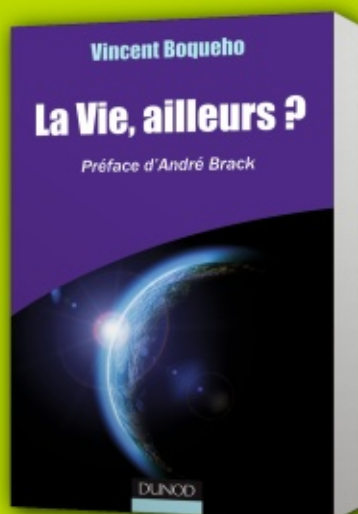
À masse équivalente, et juste après l'émission des gaz, le méthane est environ 100 fois plus absorbant que le CO₂, mais sa concentration atmosphérique diminue plus vite ; durant le siècle suivant l'émission, on estime que son rôle radiatif cumulé est 25 fois supérieur à celui du CO₂. Ce chiffre définit le « pouvoir d'échauffement global » du méthane et sa conversion en « équivalent carbone ».

Cette différence entre gaz plus ou moins absorbants et plus ou moins durables crée une difficulté importante, de sorte que certains scientifiques proposent même de ne pas les associer dans un même « marché carbone ». Elle trouve son paroxysme dans le cas de la vapeur d'eau : c'est le premier des gaz à effet de serre en termes d'action instantanée, mais sa durée de vie atmosphérique étant très courte, son effet cumulé dans le futur est négligeable. Une augmentation de la vapeur d'eau devrait bien amplifier le réchauffement futur, mais elle sera la conséquence indirecte des émissions anthropiques de gaz à effet de serre à durée de vie longue, en particulier le CO₂...

Hervé LE TREUT est climatologue et membre de l'Académie des sciences. Il dirige l'Institut Pierre-Simon Laplace (<http://www.ipsl.fr/>).

LE PLAISIR DES SCIENCES

Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie



V. BOQUEHO

9782100558629 ■ 256 pages ■ **18 €**

Sommes-nous seuls dans l'Univers ?
Le point sur les découvertes récentes



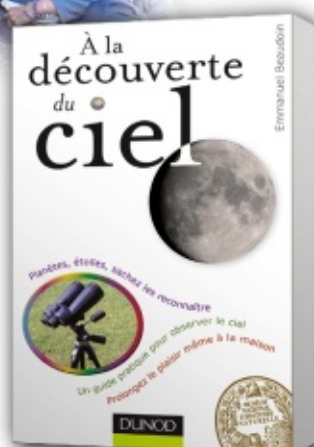
Y. VERCHIER, N. GERBER

9782100559954 ■ 192 pages ■ **14,90 €**
DUNOD / UNIVERSCIENCE

Toutes les réponses aux phénomènes
chimiques qui se cachent dans notre maison

COLLECTION L'AMATEUR DE NATURE

en partenariat avec
le Muséum national d'Histoire naturelle

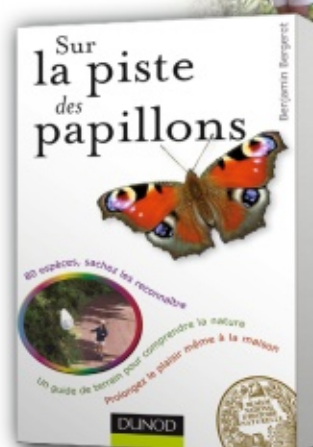


E. BEAUDOIN

9782100547708

Ces guides illustrés
vous invitent à un voyage
passionnant pour découvrir
les mystères de la nature

192 pages
15,90 €



B. BERGEROT

9782100559916



www.dunod.com

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

QUESTIONS OUVERTES

Le baclofène : un relaxant musculaire efficace contre la dépendance à l'alcool ?

D'un côté, les « résolument pour ». De l'autre, les « foncièrement sceptiques ».

Pour dépasser les luttes d'opinions, des études scientifiques validées sont indispensables.

Jean-Pol TASSIN

L'alcool est source de convivialité, mais l'alcool est aussi un fléau social : bien avant la vitesse, c'est le premier responsable des accidents mortels sur la route. C'est un facteur important de morbidité et de mortalité dans les cancers, les maladies chroniques du foie telle la cirrhose, ou les troubles psychiques. Un Français sur dix aurait un problème avec l'alcool et environ deux millions seraient alcoolo-dépendants. Sur les quelque 850 000 décès dénombrés en France chaque année, 45 000 seraient dus à l'alcool. Comme pour la plupart des addictions, les traitements médicamenteux sont encore notoirement insuffisants et plusieurs équipes, tant cliniques que fondamentales, recherchent les molécules qui pourraient enfin soulager les patients de leur incapacité à diminuer ou à arrêter leur consommation.

En 2008, le cardiologue français Olivier Ameisen a publié *Le dernier verre*, un ouvrage où il raconte comment, pour se libérer d'une dépendance à l'alcool longue de plusieurs années et après plusieurs cures de désintoxication qui avaient échoué, il prend du baclofène. Cette molécule, mise sur le marché en 1974, administrée pour soulager les contractures musculaires d'origine neurologique, tel le torticolis, n'avait *a priori* rien à voir avec le sevrage alcoolique. Le dosage conseillé par le laboratoire est de l'ordre de 30 milligrammes par jour et O. Ameisen multiplie la dose par neuf ! Et son envie d'alcool disparaît ! Le livre connaît un vif succès

et, très vite, les personnes traitées pour dépendance à l'alcool demandent à leur médecin de leur prescrire cette molécule.

Là commencent les difficultés et la polémique, car le baclofène n'a pas été mis sur le marché dans le cadre du sevrage alcoolique, et les doses efficaces semblent être très élevées et donc susceptibles d'entraîner des effets secondaires notables. De surcroît, les rares expériences cliniques réalisées, concernant chacune au plus une quarantaine de sujets, avaient donné des résultats variables. Dès lors, les médecins hésitent à prescrire cette substance présentée par d'aucuns comme miraculeuse.

Le début de la médiatisation du baclofène

Puis la télévision s'en mêle. Une émission, assez maladroite, destinée à promouvoir le baclofène est programmée sur une chaîne publique à une heure de grande écoute en septembre 2009. Bien que les quelques patients « guéris » présentés à cette occasion aient été bien peu convainquants, l'émission a un impact suffisant pour que les addictologues se trouvent sollicités, et il semble que beaucoup d'entre eux n'aient pas résisté à cet appel : en trois ans, les ventes de baclofène ont augmenté de 50 pour cent, passant de 80 millions de comprimés en 2007 à 120 millions en 2010.

De quelle molécule s'agit-il ? Quelles sont les caractéristiques du baclofène ? Commercialisée sous le nom de *Lioresal*, cette molécule a un effet inhibiteur de l'activité cérébrale. Le baclofène agit comme le principal neuromédiateur inhibiteur, le GABA : il se fixe sur un type de récepteurs de ce neuromédiateur, le récepteur GABA-B. Le baclofène freine la libération des neuromédiateurs et diminue l'activité des neurones qui transmettent les signaux électriques d'un neurone à l'autre (voir l'encadré page 24).

C'est cette activité inhibitrice qui explique pourquoi le baclofène soulage les contractures musculaires. Ainsi, parmi les différents types de neurones, certains libèrent de l'acétylcholine, le neuromédiateur qui stimule l'activité musculaire. Une contraction correspond à une stimulation excessive des muscles. Or quand le baclofène se fixe sur les récepteurs GABA-B portés par les neurones à acétylcholine, ce neuromédiateur est libéré en moins grande quantité, et les muscles cessent d'être hyperexcités.

Mais pourquoi une substance myorelaxante agirait-elle sur l'addiction à l'alcool ? Car le récepteur GABA-B est porté par de nombreux types de neurones, notamment les neurones qui libèrent la noradrénaline, la sérotonine et la dopamine, neuromédiateurs impliqués dans le circuit de la récompense. Ce dernier est constitué de plusieurs structures cérébrales connectées qui reçoivent toutes des signaux contrôlés par la dopamine – parfois qualifiée de molécule du

plaisir – et issus d'une zone profonde, l'aire tegmentale ventrale. Ce circuit fonctionne comme un baromètre qui indique à tout instant à l'individu l'état physique et psychique dans lequel il se trouve. Une augmentation de la libération de dopamine dans ce circuit correspond à une sensation de satisfaction. Les drogues – amphétamine, cocaïne, héroïne, etc. –, mais aussi l'alcool, augmentent les quantités de dopamine dans les aires cérébrales du circuit de la récompense.

Wolfram Schultz, de l'Université de Fribourg en Suisse, a montré il y a quelques années, en enregistrant les neurones qui libèrent la dopamine d'un singe éveillé, que cette libération se fait en deux étapes. Dans un premier temps, c'est une récompense inattendue, alimentaire par exemple, qui active les neurones à dopamine. Puis, si cette récompense est renouvelée, le système nerveux central apprend à repérer les événements qui l'accompagnent. Ces derniers deviennent des signaux annonciateurs, et ce n'est plus la récompense qui déclenche l'activation des neurones à dopamine, mais les signaux associés à cette récompense. Cette activation précédant l'obtention d'une récompense représenterait la motivation qui pousse à rechercher une drogue ou, plus généralement, une satisfaction.

Baclofène et circuit de la récompense

Comment évalue-t-on la motivation qui déclenche la recherche d'une récompense ? On l'étudie chez l'animal, et, pour ce faire, on dispose essentiellement de trois modèles expérimentaux : l'autoadministration, procédé au cours duquel l'animal apprend à effectuer un mouvement (appuyer sur une pédale ou mettre son museau dans un trou) pour recevoir la drogue. Le deuxième s'appelle la préférence de place : on donne à l'animal la possibilité de choisir entre deux espaces, et il choisit le plus souvent celui où il a reçu un produit qui a stimulé son circuit de la récompense. Enfin, le troisième modèle est celui de l'autostimulation électrique. Comme dans le cas de l'autoadministration, l'animal apprend à effectuer une tâche pour recevoir une petite stimulation



L'ALCOOL EST SYNONYME DE CONVIVIALITÉ, sauf pour les personnes devenues dépendantes. Le baclofène pourrait-il les aider à se libérer de cet asservissement ?

électrique de l'aire tegmentale ventrale, le site des neurones à dopamine. À mesure que la motivation de l'animal diminue, l'intensité de la stimulation électrique qui active le circuit de la récompense (encore nommé le circuit du plaisir) doit augmenter. Or on sait que la majorité des drogues diminuent ce seuil, autrement dit, elles favorisent l'activation du circuit de la récompense.

Disposant de ces modèles d'évaluation du circuit de la récompense chez l'animal, comment a-t-on testé le baclofène ? Les premières expériences étudiant son effet sur la motivation chez l'animal ont été réalisées dès 1982, mais il fallut attendre la fin des années 1990 pour qu'elles se multiplient. Elles ont toutes montré que la motivation à s'autoadministrer de l'amphétamine, de la cocaïne, de l'héroïne, de la nicotine ou de l'alcool diminue en présence de baclofène (entre un et trois milligrammes par kilogramme chez le rat). Cet effet du baclofène résulterait de l'inhibition des neurones qui libèrent la dopamine. Toutefois, si la motivation vis-à-vis des drogues diminue, celle envers la nourriture décroît aussi dès 1,6 milligramme

par kilogramme : l'effet inhibiteur du baclofène n'est pas spécifique des drogues.

Deux autres modèles expérimentaux donnent des résultats qui vont dans le même sens. D'une part, le baclofène augmente le seuil d'autostimulation électrique, et, d'autre part, l'animal est moins prêt à faire des efforts pour obtenir le produit qu'il convoite.

Les résultats des tests précliniques ne laissent donc aucun doute ; une stimulation suffisante des récepteurs GABA-B par le baclofène diminue la consommation des drogues, mais – et c'est un point non négligeable – les concentrations efficaces sur les drogues semblent diminuer aussi l'attrait pour la nourriture.

Le baclofène a-t-il d'autres effets secondaires qui pourraient réduire son intérêt dans le sevrage de l'alcool ? Chez l'animal, il en a au moins trois. D'abord, la mémoire de travail, c'est-à-dire la capacité à retenir une information récente, nécessaire à l'adoption d'une stratégie adaptée pour atteindre un but, diminue. Par ailleurs, la mémoire spatiale qui correspond, par exemple, à la capacité à retrouver un chemin dans un

labyrinthe est également perturbée. Enfin, le baclofène réduit les performances motrices et l'équilibre de l'animal.

Chez l'homme, les premières études analysant les conséquences d'un traitement au baclofène sur la consommation d'alcool ont été publiées au début des années 2000. Les résultats sont nets, mais le nombre de patients ayant participé à ces études est trop faible pour que les résultats soient incontestables. C'est d'ailleurs l'une des principales critiques que l'on peut faire aux études cliniques concernant l'efficacité du baclofène dans le traitement de la dépendance à l'alcool. Ainsi, en 2007, Giovanni Addolorato et ses collègues de l'Institut de médecine interne à Rome, qui font partie des pionniers des études sur le baclofène, ont montré un effet très positif sur une trentaine de patients cirrhotiques.

Toutefois, ces résultats restent controversés parmi les scientifiques en raison de la sélection contestable des sujets. En outre, en 2010, James Garbutt et ses collègues de l'Université de Caroline du Nord n'ont pas retrouvé

de différence entre une quarantaine de sujets traités par le baclofène, et une quarantaine d'autres ayant reçu un placebo dans la même étude. Ils ont seulement constaté que les sujets traités par le baclofène étaient moins anxieux que ceux ayant reçu le placebo.

Pourquoi le baclofène ne donne-t-il pas toujours les résultats escomptés ? Pour deux raisons. Il existerait des sous-groupes de sujets qui réagissent à cette molécule et d'autres qui réagissent moins bien, voire qui ne réagissent pas. Par ailleurs, les effets ne se feraient sentir que pour des doses administrées bien supérieures aux 30 milligrammes par jour généralement admises comme étant efficaces (des sujets ont reçu des doses allant jusqu'à 400 milligrammes par jour).

En France, deux tendances ont vu le jour en 2008 parmi les médecins qui prennent en charge les personnes dépendantes à l'alcool : les « résolument pour » et les « foncièrement sceptiques ». Les premiers estiment avoir obtenu des résultats cliniques spectaculaires et indiscutables, les autres

attendent des études statistiquement convaincantes, et ce d'autant plus que cette substance n'a pas obtenu son autorisation de mise sur le marché pour cette indication ni pour les doses requises.

Dès lors, si l'on dispose d'une molécule qui pourrait briser les chaînes de la dépendance à l'alcool dont voudraient se débarrasser tant de personnes, pourquoi aucune étude comportant un nombre suffisant de patients n'a-t-elle pas été lancée en France ? Selon les addictologues qui attendent cette étude, certaines équipes cliniques sont confrontées à un conflit d'intérêt, puisque beaucoup d'entre elles ont des contrats avec des laboratoires pharmaceutiques qui les ont chargées de tester de nouvelles molécules visant à traiter la dépendance à l'alcool. Même si l'aspect financier ne peut être totalement exclu, il est compréhensible qu'une équipe soit plus attirée vers le développement d'une nouvelle molécule qui porte beaucoup d'espoirs que vers la confirmation éventuelle de l'intérêt d'un produit qui a déjà donné des résultats contradictoires.

Le mode d'action du baclofène

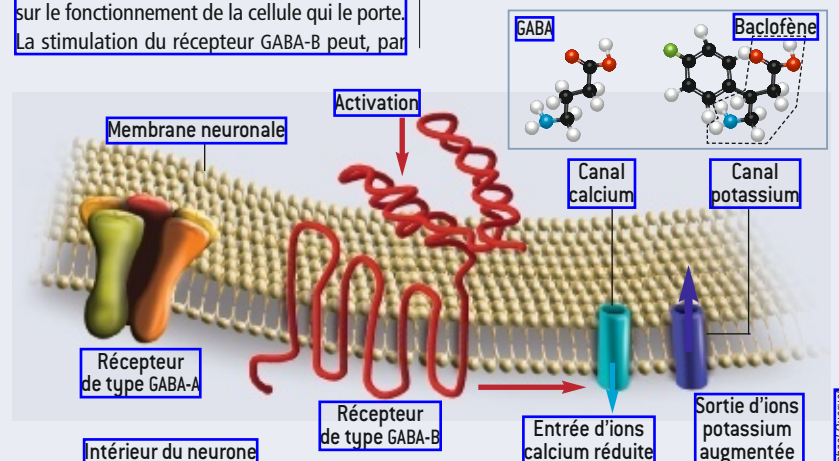
La molécule de baclofène présente une région qui ressemble à un neuromédiateur essentiel du système nerveux central, l'acide gamma-aminobutyrique, ou GABA (voir le cartouche). Il existe des neuromédiateurs qui stimulent l'activité du système nerveux central, tel l'acide glutamique, et d'autres qui l'inhibent ; le GABA est le principal neuromédiateur inhibiteur. Pour agir, le GABA doit se fixer sur ses récepteurs portés par les neurones. Il existe au moins trois grands types dans le cerveau dont deux particulièrement importants : le récepteur GABA-A, sur lequel se fixent notamment les benzodiazépines, des substances tranquillisantes, tel le Valium. La fixation des benzodiazépines sur le récepteur GABA-A facilite l'action inhibitrice du GABA libéré par les neurones.

Le récepteur GABA-A forme un canal fiché dans la membrane cellulaire ; la stimulation du récepteur entraîne une entrée massive d'ions chlore dans les neurones, ce qui entraîne une hyperpolarisation : leur activité électrique diminue. Néanmoins, si ce récepteur est situé sur des neurones inhibiteurs, l'inhibition de leur

activité (c'est-à-dire l'inhibition d'une inhibition) résulte en une activation.

Les récepteurs GABA-B sont une autre catégorie importante de récepteurs du GABA. Contrairement au récepteur GABA-A, le récepteur GABA-B n'est pas un récepteur canal. Il est constitué de sept segments transmembranaires, dont la stimulation peut avoir plusieurs conséquences sur le fonctionnement de la cellule qui le porte. La stimulation du récepteur GABA-B peut, par

exemple, diminuer l'entrée de calcium ou augmenter celle de potassium selon qu'il se trouve avant ou après la synapse, l'espace qui sépare deux neurones. Mais quelle que soit sa localisation, ce récepteur est inhibiteur : il diminue la libération de neuromédiateurs par les neurones présynaptiques ou la transmission des signaux électriques par les neurones postsynaptiques.



En fait, le baclofène présente deux inconvénients : d'une part, c'est un générique qui n'est plus protégé par aucun brevet, ce qui signifie qu'aucun laboratoire ne peut espérer de retour financier si l'intérêt de ce produit était confirmé ; d'autre part, comme nous l'avons souligné, la sensibilité à cette molécule varie notablement d'une personne à l'autre, de sorte qu'il n'existe pas de dose optimale pour tout un chacun. Michel Dettelleux, à l'Hôpital Cochin, à Paris, a déposé un projet, au Programme hospitalier de recherche clinique visant à évaluer deux doses de baclofène (60 et 120 milligrammes par jour). Des contraintes financières ont conduit à modifier ce protocole qui est passé de trois groupes (dont un qui aurait reçu un placebo) à deux groupes, dont un seul sera traité par 90 milligrammes par jour.

À quand des études cliniques fiables ?

Les résultats de cette étude ne seront connus qu'en septembre 2012 au plus tôt. Renaud de Beaurepaire, à l'Hôpital Paul-Guiraud, à Villejuif, qui fait partie des pionniers du baclofène en France et des « résolument pour », présente déjà une objection à ce type d'étude. Puisque les doses efficaces pour chaque patient varient de 1 à 15, il est illusoire de penser qu'une dose unique moyenne pourra donner des résultats statistiquement significatifs.

Ainsi, ces problèmes de doses sont au centre de l'efficacité du baclofène. Augmenter les doses signifie aussi augmenter les effets indésirables et ils sont bien connus : somnolence, fatigue, nausées, vertiges, céphalées, diarrhées, hypotension, constipation, voire douleur abdominale. Cette liste paraît longue, mais si l'on tient compte du fait que ce traitement est susceptible de libérer le patient d'une souffrance difficilement supportable et qui peut le conduire à des pathologies bien plus graves, voire à la mort, le rapport bénéfices sur risques reste nettement en faveur du traitement.

D'autant plus que les « résolument pour » expliquent que les doses peuvent être augmentées progressivement et que la plupart des effets indésirables sont réver-

sibles ; il suffit de respecter des paliers après avoir augmenté la dose afin de surveiller l'apparition d'éventuelles complications, voire de diminuer temporairement la dose.

Le seul doute vient d'études récentes non confirmées. Il existerait deux effets secondaires qui ne doivent pas être pris à la légère : d'une part, la diminution du seuil de déclenchement de crises d'épilepsie, et l'on sait que les personnes dépendantes à l'alcool présentent un risque accru d'avoir de telles crises ; d'autre part, une augmentation des idées suicidaires et des tentatives de suicide. Mais, comme c'est souvent le cas avec le baclofène, ces effets indésirables n'ont pas donné lieu à des études systématiques.

Quelle est l'attitude des autres pays ? Quelques résultats positifs ont été obtenus en Allemagne et aux Pays-Bas, où la situation est comparable à ce qui se passe en France. En revanche aux États-Unis, le baclofène n'est pas prescrit pour le sevrage alcoolique dans la mesure où il n'a pas obtenu d'autorisation de mise sur le marché – AMM – pour cette indication, et que les médecins ne prescrivent pas de médicaments sans AMM.

Ainsi, beaucoup des études précliniques et cliniques réalisées jusqu'à présent suggèrent que le baclofène entraîne une baisse de la motivation à consommer des drogues, en particulier l'alcool. Il faut néanmoins insister sur le fait que l'addiction ne peut pas être considérée comme une simple difficulté à diminuer sa consommation de drogue ou d'alcool. Il est vraisemblable que les personnes dépendantes souffrent de modifications à long terme de certains de leurs réseaux neuronaux, et que ce sont ces modifications qui les font souffrir et les conduisent à consommer pour soulager leur malaise.

En ce sens, il est peu probable que le baclofène permette à lui seul de faire disparaître ces troubles psychiques et puisse être considéré comme soignant l'addiction en tant que telle. En revanche, en permettant aux patients de diminuer, voire d'arrêter, leur consommation, il peut participer à une abstinence à long terme, et cette abstinence semble, jusqu'à présent, être l'une des meilleures thérapies de l'addiction dont on dispose.

L'AUTEUR



Jean-Pol TASSIN, directeur de recherches à l'INSERM, dirige le Groupe Physiopathologie de la dépendance et de la rechute, à l'Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, INSERM U952 / CNRS UMR 7224.

BIBLIOGRAPHIE

J.-C. Garbutt *et al.*, Efficacy and safety of baclofen for alcohol dependence : a randomized, double-blind, placebo-controlled trial, *Alcohol Clin. Exp. Res.*, vol. 34, pp. 1849-1857, 2010.

S. Vlachou et A. Markou, GABA B receptors in reward process, *Advances in Pharmacology*, vol. 58, pp. 315-371, 2010.

J.-P. Tassin, Uncoupling between noradrenergic and serotonergic neurons as a molecular basis of stable changes in behavior induced by repeated drugs of abuse, *Biochem. Pharmacol.*, vol. 75, pp. 85-97, 2008.

G. Addolorato *et al.*, Effectiveness and safety of baclofen for maintenance of alcohol abstinence in alcohol-dependent patients with liver cirrhosis : randomised, double-blind controlled study, *Lancet*, vol. 370, pp. 1915-1922, 2007.

W. Schultz *et al.*, A neural substrate of prediction and reward, *Science*, vol. 275, pp. 1593-1599, 1997.

✓ Ce texte fait suite au débat organisé en mai 2011 par l'Institut de recherches scientifiques sur les boissons, l'IREB, sur le thème : *Baclofène : pour ou contre ?*

V. Artero, N. Guillet, D. Fruchart et M. Fontecave

L'HYDROGÈNE

Une énergie propre pour demain ?

A l'heure où la plupart des constructeurs automobiles annoncent la mise sur le marché de véhicules électriques pour 2011, faut-il encore croire que l'hydrogène sera le carburant du XXI^e siècle, comme cela a été annoncé il y a quelques années ? On sait depuis longtemps récupérer de l'énergie à partir de ce gaz : le principe d'une pile à combustible, qui produit de l'électricité et de la chaleur en recombinant de l'hydrogène gazeux et de l'oxygène de l'air avec pour seul « rejet » de l'eau, a été décrit dès 1806 par le chimiste britannique Humphry Davy, et le premier prototype remonte à 1839. Depuis, la NASA a montré le potentiel de tels dispositifs lors des missions *Gemini* et *Apollo*. Pourtant, l'horizon d'une mise sur le marché d'une telle technologie ne cesse d'être repoussé... Et pour cause : d'une part, si les piles à combustible sont toujours plus performantes aujourd'hui, c'est au détriment de leur coût. D'autre part, l'hydrogène n'existe pas à l'état naturel sur Terre. Utiliser ce gaz comme carburant implique donc aussi de le produire, de le stocker et de le distribuer à

grande échelle, en toute sécurité et à bas prix. Pour chacune de ces étapes de la filière hydrogène, diverses solutions se dessinent. C'est notamment le cas pour l'un des éléments les plus coûteux de la filière – le catalyseur qui augmente la puissance et le rendement de la pile à combustible. Actuellement à base de métaux nobles tel le platine, il pourrait être remplacé d'ici quelques années par un catalyseur bon marché inspiré... de micro-organismes. Parallèlement, un stockage de l'hydrogène sous forme solide, beaucoup moins dangereux que les bonbonnes de gaz et plus compact, est aussi en cours de commercialisation. Nous examinerons ici l'intérêt potentiel de la filière hydrogène, comment produire ce gaz, comment le stocker et de quelle façon on pourrait réduire les coûts de mise en œuvre, qui restent l'un des principaux freins à son développement.

Mais d'abord, pourquoi l'hydrogène ? Pour plusieurs raisons. Ce gaz a un très fort potentiel énergétique : la molécule d'hydrogène gazeux, nommée dihydrogène, est constituée de deux atomes d'hydrogène

liés entre eux. C'est là que réside le secret : rompre cette liaison, par exemple par réaction avec l'oxygène de l'air (O_2), conduit à une importante libération d'énergie qui peut être convertie en électricité avec une pile à combustible. De plus, cette réaction ne rejette que de l'eau. L'hydrogène (par commodité, on utilisera ce terme à la place du dihydrogène) peut donc être envisagé comme une alternative non polluante aux énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon...).

Stocker les énergies renouvelables

Ensuite, il existe une matière première abondante à partir de laquelle on peut produire l'hydrogène : l'eau. Ainsi, la filière hydrogène pourrait reposer uniquement sur deux réactions chimiques qui ne rejettent pas de gaz à effet de serre. L'hydrogène peut en effet être produit par électrolyse de l'eau *via* une réaction où de l'énergie électrique assure la transformation de l'eau en hydrogène et oxy-



Produire de l'hydrogène, le stocker et le convertir en électricité à la demande est désormais possible. Pour que la filière hydrogène devienne compétitive, il reste à en réduire les coûts. Les chimistes s'inspirent de bactéries pour perfectionner les catalyseurs utilisés.

gène gazeux. Et à l'inverse, de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux peuvent être recombinaés pour produire de l'eau en libérant chaleur et électricité. Le bilan de matière de ces deux réactions est donc nul. L'hydrogène a seulement été utilisé de manière temporaire pour stocker de l'énergie, et l'eau utilisée pour le produire a été régénérée au cours du processus.

L'hydrogène peut ainsi être envisagé comme un moyen durable de stocker l'énergie électrique, offrant la possibilité de la restituer à la demande avec un assez bon rendement global. Ce principe apparaît particulièrement adapté pour le stockage des énergies renouvelables. Les sources d'énergie éolienne et solaire, par exemple, sont réparties de façon inégale et présentent un caractère intermittent peu prévisible, lié à leur dépendance aux conditions météorologiques. Le stockage des surplus d'énergie sous forme d'hydrogène permettrait un lissage de l'approvisionnement et une distribution régulière de l'énergie. Ainsi, sur l'île d'Utsira, à 18 kilomètres des côtes de la Norvège, on ali-

mente les habitations avec de l'électricité produite à partir d'éoliennes. Mais l'excédent d'électricité est utilisé pour électrolyser de l'eau et produire de l'hydrogène, lequel est stocké sur place. Ce gaz est ensuite combiné à de l'oxygène de l'air dans une pile à combustible lorsque le vent faiblit, et est ainsi reconverti en énergie électrique. Une dizaine d'habitations sont ainsi alimentées uniquement par de l'énergie renouvelable ! Des projets similaires sont mis en place en Corse et sur l'île de La Réunion pour évaluer l'intérêt d'alimenter en électricité des sites isolés au moyen d'énergie solaire photovoltaïque.

Il s'agit donc de construire en grande quantité et à un coût raisonnable des dispositifs fiables de production et d'utilisation de l'hydrogène. C'est encore loin d'être le cas : si plusieurs technologies performantes existent, aucune ne concilie à la fois faible coût, compacité et durabilité. C'est tout l'enjeu des recherches sur l'hydrogène aujourd'hui.

La première étape de la filière hydrogène est sa production. Celle-ci, nous

L'ESSENTIEL

✓ À la différence du pétrole, l'hydrogène n'est pas disponible à l'état libre : il faut le produire à partir d'une autre ressource énergétique, si possible renouvelable.

✓ Plusieurs dispositifs existent, tant pour sa production que pour son stockage, mais aucun ne concilie faible coût, compacité et durabilité.

✓ Pour les améliorer, on s'inspire de certaines bactéries, qui produisent de l'hydrogène à l'aide d'enzymes, et l'on envisage un stockage de l'hydrogène sous forme solide.

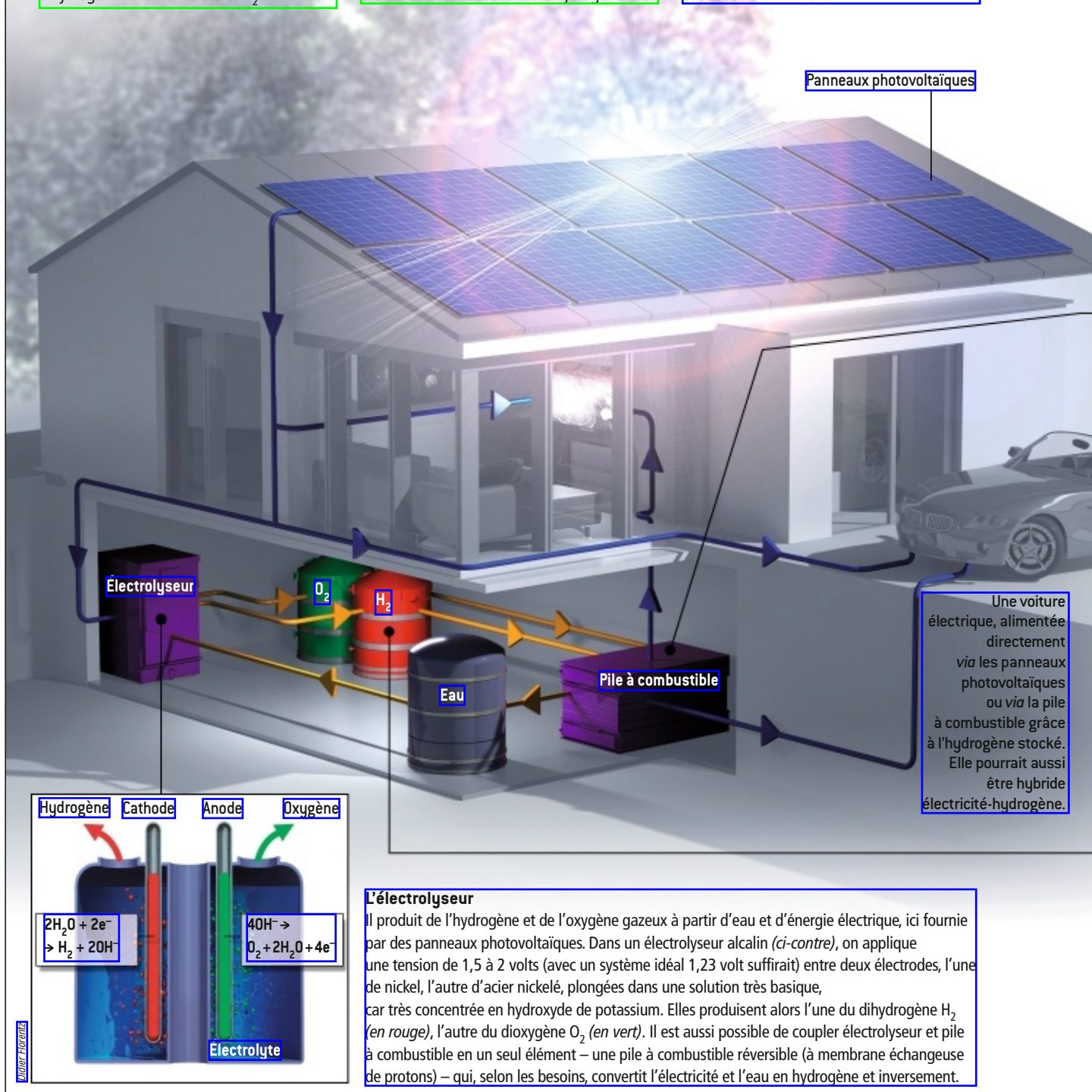
© Shutterstock/Anna Ushchenko

VERS UNE ÉCONOMIE DE L'HYDROGÈNE

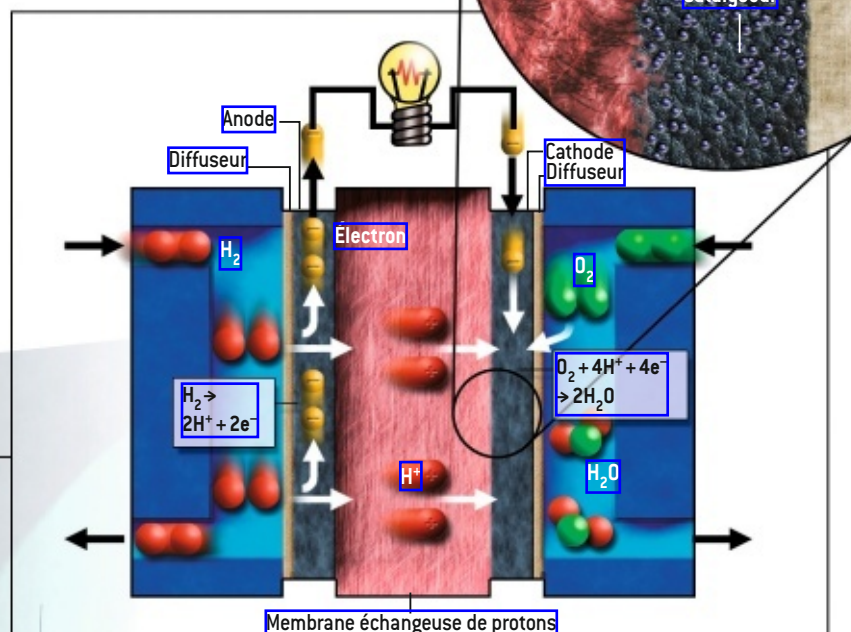
Dans les habitations de demain, des panneaux photovoltaïques transformeront la lumière solaire en électricité qui sera directement utilisée pour alimenter les appareils électroménagers et les véhicules électriques. Le surplus d'énergie sera acheminé vers un électrolyseur, où il assurera la transformation d'eau en dihydrogène H_2 et dioxygène O_2 : cette réaction convertit l'énergie électrique en énergie de liaison des atomes d'hydrogène dans les molécules H_2 .

Les deux gaz seront acheminés dans deux réservoirs différents. L'hydrogène pourra être stocké sous forme solide, associé à un métal – un conditionnement qui offre une meilleure compacité qu'un conteneur d'hydrogène gazeux. En l'absence de soleil, l'hydrogène et l'oxygène seront déstockés et acheminés vers une pile à combustible, qui les transformera en eau, libérant, sous forme d'électricité, l'énergie préalablement stockée sous forme d'hydrogène.

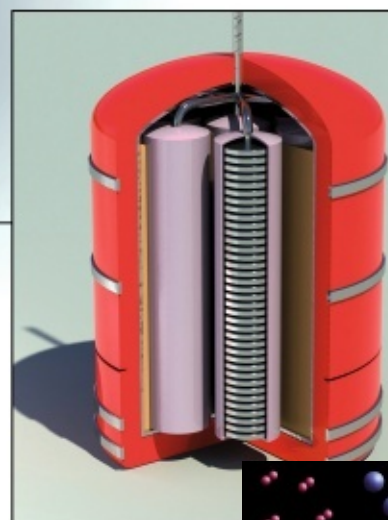
Un catalyseur (abondant et bon marché), déposé sur les électrodes facilitera la réaction, augmentant son rendement. Fondée sur la conversion, le stockage et la distribution d'énergies renouvelables, cette filière énergétique n'émet pas de dioxyde de carbone. Les chimistes travaillent à la rendre propre sur toute sa chaîne de production, des panneaux photovoltaïques au catalyseur, tout en améliorant son coût et son rendement.



Les électrodes
L'anode et la cathode sont constituées de fines particules – des nanotubes de carbone ou des grains de noir de carbone de 50 nanomètres de diamètre – sur lesquelles est déposé le catalyseur : des particules de platine de quelques nanomètres de diamètre ou des molécules imitant le site actif d'enzymes qui libèrent de l'hydrogène chez des bactéries.

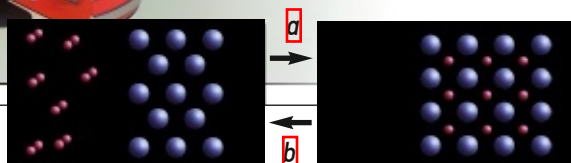


Pile à combustible à membrane échangeuse de protons
Elle transforme le dihydrogène H_2 et le dioxygène O_2 en eau et énergie électrique : le dihydrogène traverse un diffuseur – une matière carbonée poreuse – et atteint l'anode de la pile où il est dissocié en deux protons H^+ et deux électrons. Les électrons circulent vers la cathode dans un circuit électrique qui alimente la maison. Dans le même temps, les protons traversent une membrane en polymère dite échangeuse de protons, et sont attirés par la cathode, où ils se combinent à des électrons libérés par cette électrode et à du dioxygène, reformant de l'eau.



Réservoir d'hydrogène

L'hydrogène est stocké sous forme solide dans des structures métalliques : quand on abaisse la température, les molécules d'hydrogène réagissent avec le métal, se dissocient et s'insèrent dans la structure pour former un hydrure métallique (a). Quand on remonte la température, le gaz d'hydrogène se reconstitue (b). Le métal est entouré d'un « tampon » qui stocke la chaleur dégagée pendant le stockage et la restitue lors du déstockage. Un conteneur de la taille d'un gros cumulus domestique contient 4,5 kilogrammes d'hydrogène, ce qui suffit pour couvrir les besoins d'une famille française durant plus d'une semaine.



L'avons vu, peut se faire par électrolyse de l'eau (on sait également produire de l'hydrogène à partir de biomasse, mais les procédés sont en cours de développement, voir l'encadré page 34). Un électrolyseur est un système électrochimique qui convertit l'énergie électrique en énergie chimique. Il en existe plusieurs types. L'électrolyse dite alcaline de l'eau est sans doute la moins coûteuse et la plus aboutie. Son principal avantage réside dans le fait que ces électrolyseurs peuvent être fabriqués avec des matériaux abondants et peu coûteux : deux simples électrodes, à base d'acier ou de nickel, plongées dans une solution très basique – l'électrolyte – et parcourues par un courant électrique produisent respectivement de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux (voir l'encadré ci-contre).

Produire l'hydrogène par électrolyse de l'eau

Développée depuis de nombreuses années pour la production d'hydrogène à l'échelle industrielle, cette technique a montré sa fiabilité. La principale limite des dispositifs actuels, outre qu'ils sont très encombrants, réside dans leur grande sensibilité aux brusques variations de courant ; la plupart des électrolyseurs alcalins industriels doivent également recevoir en permanence un courant minimal et éviter les arrêts fréquents. Une contrainte difficilement compatible avec l'approvisionnement irrégulier des sources d'énergie renouvelables. Ainsi, cette technique semble mieux adaptée pour le stockage d'énergie produite en excès durant la nuit par les centrales nucléaires que pour celui des énergies renouvelables.

Dans ce contexte, une autre technologie en cours de développement, l'électrolyse haute-température (entre 750 et 800 °C), est prometteuse. Elle consiste à utiliser la chaleur produite par une source externe non valorisée – telle la chaleur éliminée dans des tours de refroidissement – pour activer la réaction d'électrolyse et atteindre ainsi des rendements de conversion élevés.

La solution la plus pratique pour la production d'hydrogène à partir d'une source d'énergie intermittente semble être l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons : l'électrolyte est remplacé par une membrane polymère très mince (100 à 200 micromètres – soit l'épaisseur

LES AUTEURS



Vincent ARTERO est chercheur au Laboratoire de chimie et biologie des métaux (CEA/CNRS/Université Joseph Fourier Grenoble 1) du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), à Grenoble.

Nicolas GUILLET est ingénieur-chercheur au Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (LITEN) du CEA, à Grenoble.

Daniel FRUCHART est directeur de recherche émérite à l'Institut Néel du CNRS, à Grenoble. Il est directeur scientifique de la Société McPhy-Energy.

Marc FONTECAVE est professeur au Collège de France, titulaire de la chaire de Chimie des processus biologiques.

d'un cheveu) imperméable aux gaz et isolante vis-à-vis des électrons, mais qui conduit les protons, de l'électrode où ils sont produits (anode) vers celle où ils sont consommés (cathode). Fonctionnant entre la température ambiante et 80 °C, avec une alimentation en eau pure et sur une large plage de courant (jusqu'à quatre ampères par centimètre carré), ces dispositifs allient compacité et forte réactivité aux brusques variations de courant.

Ces trois types de procédés – alcalin, à membrane échangeuse de protons et à haute température – existent aussi pour les piles à combustible qui convertissent l'énergie chimique contenue dans l'hydrogène gazeux en énergie électrique, à travers un fonctionnement inverse de celui des électrolyseurs.

Les premières piles à combustible utilisées étaient de type alcalin, développées pour les applications spatiales dans le cadre des programmes *Gemini*, *Apollo*, *Soyouz* dans les années 1960. Peu coûteux, ce dispositif est cependant incompatible avec le dioxyde de carbone atmosphérique (qui perturbe son fonctionnement en réagissant avec l'hydroxyde de potassium de l'électrolyte) et nécessite un apport d'oxygène purifié. C'est pourquoi la plus grande partie de l'effort en recherche et développement des der-

nières années s'est concentrée sur les piles à combustible à membranes échangeuses de protons.

Ces dispositifs offrent une vaste gamme de puissances (de 0,1 watt à 100 kilowatts) et permettent d'obtenir des rendements de conversion électrique compris entre 50 et 70 pour cent. Ils ont d'ores et déjà trouvé des marchés d'applications pour la génération autonome d'électricité, en habitat isolé ou pour des applications mobiles telles que l'électronique. Ils ont aussi été retenus par la plupart des constructeurs automobiles pour le développement de véhicules à hydrogène.

Piles à combustible réversibles

Ainsi, tant pour la production d'hydrogène par électrolyse que pour sa conversion en électricité dans une pile à combustible, les systèmes à membranes échangeuses de protons sont parmi les dispositifs les plus prometteurs. On peut d'ailleurs combiner les deux fonctions au sein d'un même appareil, nommé pile à combustible réversible, qui, couplé à un dispositif de stockage, produit de l'hydrogène en cas de surproduction d'électricité et la restitue le moment venu. Peu encombrant et nécessitant peu de maintenance, ce système est compatible avec une application domestique. Le coût des matériaux nécessaires (membrane et catalyseur) reste le principal frein au développement de la méthode.

Les dispositifs à membrane échangeuse de protons nécessitent en effet l'utilisation de métaux nobles pour la fabrication des électrodes. Comme ces systèmes fonctionnent en milieu acide, on ne peut utiliser les métaux abondants tels le fer, le cobalt et le nickel, qui s'oxyderaient et se dissoudraient rapidement. Or, aux températures de fonctionnement des systèmes à membrane échangeuse de protons, il est indispensable de recourir à des catalyseurs : ces molécules ont la particularité d'abaisser les barrières d'énergie nécessaire pour déclencher les réactions, ce qui favorise et accélère leur déroulement. Les métaux nobles tels le platine, le palladium et l'iridium sont ainsi couramment utilisés, mais ils sont rares et chers – un kilogramme de platine vaut 40 000 euros ! – d'autant qu'ils sont déjà largement utilisés dans les pots catalytiques des véhicules.

La consommation d'une famille

Pour comprendre la pertinence de l'hydrogène en tant que moyen durable de stockage et de distribution d'énergie renouvelable, considérons un cas simple : une famille vivant en France consomme en moyenne (hors chauffage – cette dépense énergétique triplerait la consommation) entre 2 500 et 3 100 kilowattheures par an d'électricité. En utilisant un système à base de piles à combustible de 5 kilowatts présentant un rendement électrique de 50 pour cent et sachant que la combustion du dihydrogène libère 33 kilowattheures par kilogramme, il suffit de produire chaque jour 500 grammes de dihydrogène – à partir de 2,3 litres d'eau – pour assurer les besoins énergétiques de cette famille. Un électrolyseur consommant environ 54 kilowattheures

d'électricité par kilogramme de dihydrogène produit, il faut un minimum de 27 kilowattheures produits chaque jour par des panneaux solaires.

Compte tenu des variations quotidiennes et saisonnières de l'ensoleillement en France métropolitaine, il serait donc nécessaire d'installer un système à 8 kilowatts-crête, soit la production d'électricité d'environ 55 mètres carrés de panneaux solaires actuels en silicium polycristallin. Bien sûr, avec une demande énergétique plus faible (ampoules à basse consommation, électroménager moins énergivore, modifications du mode de vie...), les surfaces nécessaires diminueraient d'autant. Sans compter que la chaleur produite par l'électrolyse et le fonctionnement de la pile à com-

bustible peut contribuer au chauffage de l'eau sanitaire et de l'habitation.

Dans l'état actuel, on estime que le coût global – couvrant l'amortissement de l'investissement initial et les coûts de maintenance – de production de dihydrogène à partir de sources d'énergies renouvelables et intermittentes (éolien, photovoltaïque) peut varier entre 4 et 20 euros par kilogramme, soit un coût de deux à dix euros par jour pour couvrir les besoins hors chauffage d'une famille moyenne française, contre environ un euro par jour actuellement avec une alimentation énergétique exclusivement via le réseau électrique. D'où l'intérêt de diminuer le coût des composants du système... et de consommer moins.

Aujourd'hui, une pile à combustible destinée à alimenter les moteurs électriques d'un véhicule de taille moyenne contient entre 20 et 30 grammes de platine, ce qui représenterait, au cours actuel du platine, plus de 20 pour cent du prix de revient d'une pile produite en série. Il n'y aurait d'ailleurs pas assez de métaux nobles sur la planète pour équiper rapidement tous les véhicules de par le monde. On estime à 30 000 tonnes la quantité totale de platine disponible, et on en extrait actuellement 200 tonnes par an, soit de quoi fabriquer les piles à combustible pour équiper dix millions de véhicules. Or la planète compterait plus de 700 millions de véhicules...

Ainsi, avec la technologie actuelle, près d'un tiers des ressources totales de platine seraient mobilisées dans le parc automobile, sans compter les pertes dues à un recyclage incomplet (actuellement seulement 50 pour cent du platine d'une pile à combustible sont récupérés *in fine*).

Pour lever cette difficulté, il faudrait diminuer la quantité de métaux nobles nécessaire au fonctionnement optimal de ces systèmes. L'objectif est de réduire à deux ou trois grammes la quantité de platine nécessaire au fonctionnement d'une pile à combustible alimentant un véhicule (divisant par dix les quantités actuelles) – soit 0,1 gramme de platine par kilowatt d'énergie électrique produite –, et cela, sans diminution ni des performances ni de la durée de vie des dispositifs. Plusieurs voies sont explorées. La première consiste à mieux disposer le catalyseur au sein de la couche réactive. L'idée : ne mettre que ce qu'il faut, là où il faut !

L'essor des nanotechnologies a permis la synthèse de particules de platine parfaitement calibrées à l'échelle nanométrique et, surtout, l'organisation de ces dépôts pour optimiser les surfaces de réaction et ainsi l'activité catalytique. Cependant, l'objectif de 0,1 gramme de platine par kilowatt d'énergie électrique produite semble difficile à atteindre avec le platine seul.

La deuxième solution vise à augmenter les propriétés électrocatalytiques intrinsèques des catalyseurs. En alliant le platine à des métaux de transition moins onéreux (nickel, cobalt, manganèse, fer...) au sein de nanoparticules, on obtient des catalyseurs présentant des performances supérieures à celles du platine seul.

Enfin, un fonctionnement des piles à combustible à plus haute température



1. SUR L'ÎLE D'UTSIRA, EN NORVÈGE, l'électricité qui alimente les habitations est produite par deux éoliennes. Le surplus d'énergie est stocké sous forme de dihydrogène non loin des éoliennes, puis reconverti en électricité lorsque le vent est insuffisant.

(150 °C au lieu des 80 °C actuels) permettrait de réduire la quantité de métaux nobles nécessaires et limiterait leur empoisonnement par certaines impuretés et polluants (CO , NO_x , SO_2 , H_2S , NH_3 ...) présents dans les gaz réactifs (air et hydrogène). Cela nécessite cependant le développement de nouvelles membranes échangeuses de protons fonctionnant sur une plage plus large de températures.

Des catalyseurs inspirés de la nature

Ces trois voies sont explorées en parallèle. Au cours des cinq dernières années, les avancées techniques et les progrès en modélisation de nombreux organismes, notamment le Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (LITEN, CEA Grenoble), ont conduit à une réduction substantielle de la quantité de métaux nobles nécessaires au bon fonctionnement des piles à combustible. On approche aujourd'hui en laboratoire 0,25 gramme de platine par kilowatt d'énergie électrique produite.

Certains micro-organismes ont élaboré des systèmes enzymatiques efficaces pour catalyser les réactions qui ont lieu dans les électrolyseurs ou les piles à combustible. Notamment, ces systèmes n'utilisent que des métaux abondants. Par exemple, pour réduire l'eau en hydrogène ou inversement, les hydrogénases présentes dans de nombreuses bactéries ou micro-algues

utilisent du nickel ou du fer. Ces enzymes constituent ainsi une source d'inspiration pour les chimistes, qui inventent de nouveaux catalyseurs reproduisant certaines propriétés structurales et fonctionnelles des sites actifs de ces enzymes.

Cette approche, dite de chimie bio-inspirée, a été mise en œuvre avec succès par l'équipe de Marc Fontecave et Vincent Artero au Laboratoire de chimie et biologie des métaux (CEA-CNRS-Université J. Fourier, au CEA de Grenoble). Récemment, en collaboration avec Serge Palacin et Bruno Jousset, du Laboratoire de chimie des surfaces et interfaces (CEA de Saclay) et en combinant chimie bio-inspirée et nanosciences, il a été possible d'élaborer, pour la première fois, un matériau sans métal noble qui catalyse aussi bien la production d'hydrogène à partir de l'eau (dans les électrolyseurs) que son oxydation (dans les piles à combustible). Dans ce matériau, un atome de nickel est niché au cœur d'une molécule reproduisant certaines caractéristiques des hydrogénases, laquelle est greffée sur des nanotubes de carbone (voir la figure 2). Les nanotubes offrent une surface importante et une bonne conductivité électrique.

Déposé sur une électrode et testé au LITEN (CEA), le matériau obtenu s'est révélé à la fois stable et capable de fonctionner de façon réversible et en milieu acide, ce qui le rend compatible avec les technologies à membranes échangeuses de protons. Jusqu'à présent, seul le platine était connu pour avoir de telles propriétés. Bien sûr, les densités de courant

électrique obtenues sont encore faibles, de l'ordre de 100 à 1 000 fois inférieures à celles obtenues avec du platine, mais le coût de ce matériau est moindre. Si de nombreuses étapes restent à franchir pour développer un catalyseur bio-inspiré capable de rivaliser avec le platine, le nouveau matériau présente d'autres avantages, tels qu'une bonne tolérance au monoxyde de carbone qui contamine souvent l'hydrogène, notamment lorsqu'il est produit à partir de biomasse, et qui empoisonne les catalyseurs à base de platine.

Une telle approche bio-inspirée peut aussi être exploitée pour développer de nouveaux matériaux pour membranes échangeuses de protons. Aujourd'hui, ces membranes sont principalement réalisées à base d'un polymère perfluoré sulfoné (le plus connu est le Nafion®, commercialisé depuis les années 1960 par la Société *DuPont*). Toutefois, la présence de fluor dans sa composition rend la production de ce matériau très coûteuse et impose un recyclage efficace. Or, chez les organismes vivants, le transport de protons à travers les membranes est un processus fondamental de la respiration. En créant des canaux à travers une membrane et en greffant des acides aminés (les constituants des protéines) sur leurs parois, Thomas Berthelot et ses collègues du CEA à Saclay ont reproduit la structure des pompes à protons situées dans la membrane des mitochondries, les compartiments de la cellule où ont lieu de tels échanges de protons, qui assurent la respiration cellulaire. On obtient ainsi un matériau compétitif avec le Nafion, mais moins sensible au dessèchement et présentant une bien meilleure stabilité mécanique.

Reste une autre difficulté : le stockage de l'hydrogène. Ce gaz, le moins dense de tous, ne se liquéfie qu'à très basse température (-253 °C à pression atmosphérique). Mais ce n'est pas vraiment un écueil puisque la liquéfaction de l'hydrogène n'est pas envisageable, ce processus consommant presque la moitié de l'énergie chimique stockée dans les molécules d'hydrogène. En outre, l'hydrogène liquide ne se conserve pas : il s'évapore peu à peu du fait des pertes thermiques du récipient.

On peut aussi stocker l'hydrogène gazeux sous une forme comprimée. Pour les applications liées au transport, des solutions de stockage à haute pression (de 350 à 700×10^5 pascals, soit de 350 à 700 fois la pression atmosphérique) sont proposées.

La photosynthèse artificielle

✓ **Un système pourrait-il capter la lumière et la transformer directement en hydrogène ?**

C'est ce qu'envisagent les scientifiques aujourd'hui.

Via la photosynthèse, les organismes vivants utilisent l'énergie solaire pour produire de la biomasse en fixant le dioxyde de carbone. Certaines algues et bactéries photosynthétiques produisent même de l'hydrogène à partir d'eau et de lumière.

Les chercheurs tentent d'imiter ce processus en couplant les catalyseurs de l'électrolyseur (qui produisent l'hydrogène et l'oxygène) à un photosensibilisateur qui absorbe la lumière solaire et la convertit en électrons. Dans ce dispositif, les électrons sont directement transférés du photosensibilisateur vers les catalyseurs.

Encore au stade de la recherche fondamentale, cette technologie pourrait concurrencer le couplage photovoltaïque-électrolyse, d'une part, grâce à la compacité et à la simplicité des dispositifs et, d'autre part, car elle offrirait une alternative bon marché aux matériaux coûteux utilisés dans les cellules photovoltaïques et les électrolyseurs à membranes échangeuses de protons (voir *De l'énergie issue de feuilles artificielles*, page 36).

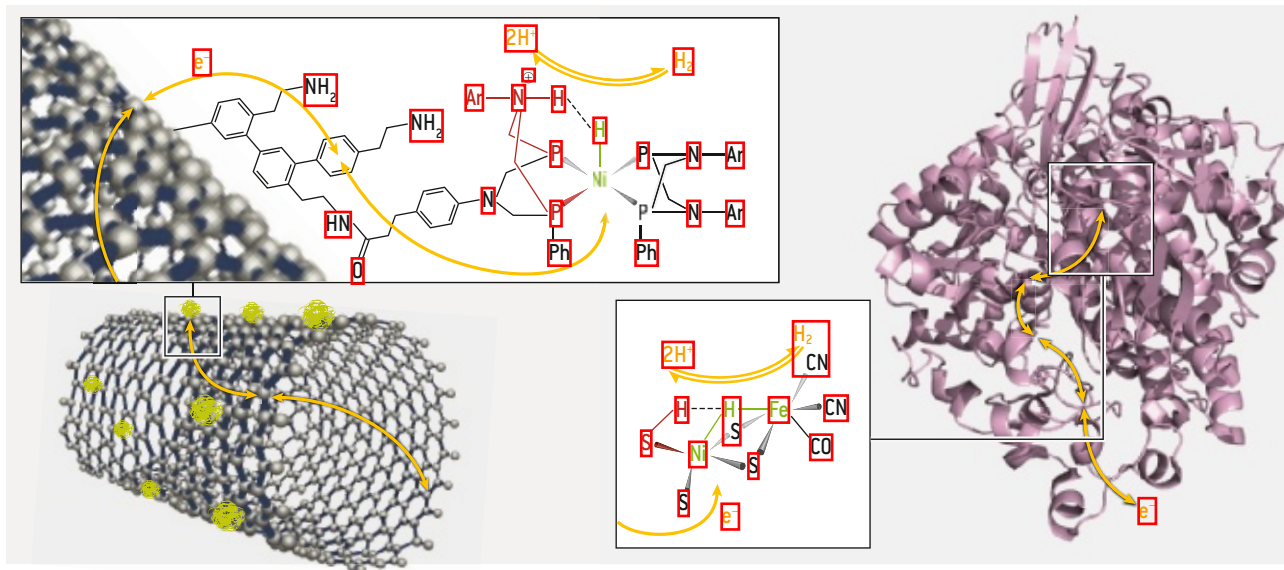
Le conteneur doit alors garantir un stockage efficace et en toute sécurité à de telles pressions et supporter environ 5 000 cycles de remplissage. Or il ne doit pas être en métal, car l'hydrogène diffuse à travers la plupart des parois métalliques, les fragilisant à moyen terme. La solution retenue par des équipes du CEA pour élaborer un réservoir de véhicule renfermant 4,2 kilogrammes d'hydrogène consiste à effectuer un moulage rotatif d'une matière plastique composite (d'une seule pièce, la matière plastique est plus résistante, tout en étant imperméable à l'hydrogène). L'utilisation de ce type de conteneur est en cours d'étude chez *Air Liquide*.

Stocker l'hydrogène sous forme solide

Une autre solution consiste à tirer parti de la capacité du dihydrogène à s'insérer dans les structures métalliques pour former des composés nommés hydrures. Un tel stockage dit solide de l'hydrogène est développé par la Société *McPhy-Energy* qui met en application les résultats obtenus dans l'équipe de Daniel Fruchart, à l'Institut Néel du CNRS à Grenoble. Ainsi, un matériau contenant principalement du magnésium métallique (Mg) se transforme en hydrure de magnésium MgH_2 lorsqu'il est placé sous 10^6 pascals d'hydrogène. Selon ce procédé, le matériau absorbe jusqu'à plus de six pour cent de sa masse en hydrogène, qui est libéré dès que la pression devient inférieure à 2×10^5 pascals.

Certains réservoirs contiennent en outre un matériau à changement de phase, qui stocke la chaleur dégagée pendant la phase de stockage pour la restituer lors du déstockage, ce qui favorise celui-ci. En associant plusieurs réservoirs avec matériau à changement de phase au sein d'un conteneur classique utilisé pour le transport de marchandises (environ 37 mètres cubes), on stocke sous forme d'hydrure solide (MgH_2) l'équivalent de 70 kilogrammes d'hydrogène gazeux, soit 2,3 mégawattheures, avec un rendement de restitution de l'énergie supérieur à 95 pour cent. Une unité de même taille sans matériau à changement de phase stocke quant à elle jusqu'à 700 kilogrammes d'hydrogène (23 mégawattheures), mais avec un rendement de 60 pour cent.

Très sûrs et supportant plusieurs milliers de cycles de stockage et déstockage, ces réservoirs ont la souplesse de fonction-



2. LE CATALYSEUR À BASE DE NICKEL conçu au CEA par Vincent Artero et ses collègues (à gauche) est inspiré du fonctionnement d'une hydrogénase, une enzyme qui transforme l'eau en dihydrogène et inversement dans des bactéries et des micro-algues (à droite). Dans l'enzyme, des agrégats métalliques (non représentés) guident les électrons (e^-) vers le site catalytique

(en vert), constitué d'un atome de nickel (Ni) et d'un atome de fer (Fe), où se déclenche alors la transformation de l'eau en dihydrogène H_2 (la réaction inverse est aussi possible). Le catalyseur synthétique, quant à lui, est fixé à un nanotube de carbone. Guidés par le nanotube et la molécule de liaison, les électrons atteignent de même le site catalytique, constitué de nickel.

nement requise pour le stockage des énergies renouvelables : ils fonctionnent quelle que soit la quantité d'hydrogène qui leur parvient et libèrent l'énergie à la demande. Ils sont aussi adaptés pour le stockage de l'hydrogène tant au niveau d'une habitation que d'une station-service, qu'elle soit autonome grâce à des capteurs solaires ou des éoliennes, ou régulièrement approvisionnée par conteneur d'hydrogène solide.

À cause de la masse de l'hydrure métallique et des conditions de température nécessaires, la technologie n'est pas encore transposable à un véhicule. Néanmoins, les performances de certains hydrures légers laissent entrevoir des voitures hybrides, combinant moteur thermique et pile à combustible, ce qui augmenterait leur autonomie. Par exemple, des hydrures à base de titane, de vanadium ou de chrome, disposés dans un réservoir hybride où l'hydrogène est stocké à la fois sous forme solide et sous forme comprimée à 300 bars, fonctionnent à température ambiante. C'est une solution envisagée par Toyota, étudiée à Grenoble en collaboration avec le LITEN (CEA), l'Institut Néel et autres partenaires. Une autonomie de 600 kilomètres peut être assurée pour une masse et un volume de réservoir compatibles avec un véhicule actuel. Le rendement énergétique doublerait alors et le coût serait inférieur à celui des batteries au lithium utilisées actuellement dans les automobiles électriques. Et le rechargement serait plus rapide... (le

« plein d'hydrogène » ne durerait que quelques secondes). Là encore, cependant, le coût du matériau composite de stockage reste trop élevé.

Une mutualisation de l'hydrogène ?

Actuellement, aucun procédé de production d'énergie à partir de ressources renouvelables (à l'exception de la production hydro-électrique déjà saturée) n'est compétitif en termes de coût de production avec ceux utilisant les carburants fossiles ou l'énergie nucléaire. L'augmentation du coût des carburants fossiles ou l'instauration de taxes pour l'émission de dioxyde de carbone pourraient modifier ce constat à moyen terme. Ainsi, le développement d'un bouquet énergétique incluant des énergies alternatives nécessite aujourd'hui des incitations fiscales telles que la TVA réduite ou le crédit d'impôt offert pour l'équipement de l'habitation principale en panneaux photovoltaïques.

Les technologies couplant énergies renouvelables et stockage à l'hydrogène se développent sur de petits marchés, par exemple pour la production et le stockage de l'énergie en habitat isolé ou pour des applications autonomes mobiles (utilisées en expédition ou pour la navigation de plaisance, par exemple). Mais le problème du stockage des énergies alternatives va vite se poser à plus grande échelle : le 12 novem-

bre 2010, le parc éolien français a couvert 5 pour cent de la consommation nationale, avec une pointe à 7,9 pour cent dans la nuit. Sans une régulation *via* un stockage adapté, il sera bientôt impossible de concilier les besoins du réseau et le caractère aléatoire de cet apport énergétique. D'où l'intérêt de l'hydrogène...

L'hydrogène permet en outre d'envisager une organisation décentralisée, individualisée et autonome de la production d'énergie et de son utilisation, où tout un chacun serait tour à tour producteur, utilisateur et distributeur d'hydrogène vers ses proches voisins. C'est le système original proposé en 2002 par l'économiste américain Jeremy Rifkin dans son ouvrage *L'économie hydrogène : après la fin du pétrole, la nouvelle révolution économique*.

L'utilisation de l'hydrogène est aujourd'hui maîtrisée et sécurisée. En produisant l'hydrogène chez soi, on évite la mise en place d'infrastructures lourdes et coûteuses de production et de distribution de l'hydrogène et on limite les pertes énergétiques lors de l'acheminement de l'électricité et de l'hydrogène.

Bien sûr, la transition entre le modèle énergétique industriel actuel – qui privilégierait une production à grande échelle dans des centrales gigantesques reliées, d'une part, à de vastes étendues de panneaux photovoltaïques et d'éoliennes et, d'autre part, à un réseau de gazoducs – et un modèle ultra-décentralisé, s'il voit le

Produire de l'hydrogène à partir de biomasse

Si l'eau est la matière première la plus abondante pour produire l'hydrogène par électrolyse, d'autres pistes à partir de matière organique abondante sont explorées. Aujourd'hui, le vaporeformage du gaz naturel – le méthane – est la méthode la plus économique pour produire de l'hydrogène : exposé à de la vapeur d'eau très chaude, le gaz libère les atomes d'hydrogène qu'il contient, sous forme de dihydrogène. Néanmoins, parce que le méthane n'est pas une ressource renouvelable et que le processus rejette du dioxyde de carbone, il est préférable d'utiliser d'autres molécules organiques, par exemple celles issues de la biomasse.

Cette solution est neutre en carbone puisque la quantité de dioxyde de carbone produit correspond à celle captée par les plantes grâce à la photosynthèse. Elle pourrait contribuer à la production renouvelable d'hydrogène en couvrant dix pour cent des besoins nationaux en énergie primaire.

Le procédé le plus efficace est la pyrolyse à haute température, qui transforme la biomasse en gaz avec des rendements de l'ordre de 40 à 50 pour cent si la température atteint 1 200 à 1 400 °C (ou 900 à 1 000 °C en présence de catalyseurs spécifiques). Il libère du dihydrogène, du méthane, du dioxyde de carbone, mais aussi du monoxyde de car-

bone (CO), toxique et inhibiteur des catalyseurs des piles à combustible à membranes échangeuses de protons – dispositifs parmi les plus prometteurs pour convertir l'énergie contenue dans l'hydrogène en électricité à usage domestique ou dans les transports. Ce gaz doit donc être éliminé du mélange produit. On peut aussi utiliser le mélange tel quel, dans des piles à combustible fonctionnant à haute température, moins sensibles aux gaz polluants, ou le transformer en carburant liquide.

Par ailleurs, des processus de digestion de la biomasse par fermentation, produisant de l'hydrogène à température ambiante, sont à l'étude. On envisage aussi d'utiliser certains

organismes photosynthétiques qui tirent une partie de leur énergie du soleil : la bactérie *Rhodobacter capsulatus*, par exemple, produit de l'hydrogène par fermentation « à la lumière » (photofermentation) de certains glucides issus de déchets de l'industrie agricole ou papetière. Il reste cependant à améliorer les rendements de décomposition de la cellulose et de la lignine en petites molécules (sucres, etc.), car ces deux polymères végétaux sont très résistants à l'hydrolyse. À terme, on rêve de domestiquer certaines algues pour leur faire produire de l'hydrogène par photosynthèse, à partir d'eau et d'énergie solaire, sans passer par la production de biomasse.

✓ SUR LE WEB

L'association française de l'hydrogène (AFH₂) : www.afh2.org

✓ BIBLIOGRAPHIE

L'hydrogène, carburant de l'après-pétrole ? [collectif], Collection « IFP Energies Nouvelles Publications », Technip, à paraître.

P. Menanteau et al., Une analyse économique de la production d'hydrogène pour des usages transport à partir d'électricité éolienne, *Revue de l'Énergie*, vol. 61, pp. 322-333, 2010.

P. Lucchese, L'hydrogène est-il incontournable ?, *Dossier Pour la Science*, n° 69, pp. 112-117, 2010.

A. Le Goff et al., From hydrogenases to noble metal-free catalytic nanomaterials for H₂ production and uptake, *Science*, vol. 326, pp. 1384-1387, 2009.

S. Ashley, Voiture à hydrogène : la route sera longue, *Pour la Science*, n° 330, pp. 46-52, 2005.

L'hydrogène, carburant de demain ?, *L'Actualité Chimique*, numéro spécial, décembre 2001.

jour, sera progressive. Mais des autoroutes de l'hydrogène se développent déjà, notamment en Californie ou en Norvège, avec des installations de production d'hydrogène de petite taille à proximité de stations-service réparties le long des voies de circulation. Ce ne sont là pour l'instant que des prototypes. Cependant, une infrastructure délocalisée de production d'hydrogène s'étend déjà, notamment dans le Nord de la France, la Belgique et les Pays-Bas, pour répondre à la demande croissante en hydrogène de l'industrie pour le raffinage des hydrocarbures ou la production d'engrais (l'hydrogène est utilisé pour la fabrication d'ammoniac, précurseur du nitrate d'ammonium).

La voiture à hydrogène : pas pour tout de suite

Concernant les transports, la route sera plus longue, mais de nombreux progrès ont été réalisés au cours des dernières années. Des piles à combustible et des réservoirs d'hydrogène, sous forme comprimée ou solide, sont aujourd'hui intégrés dans des automobiles de taille standard, alors qu'en 2002, ces deux composants occupaient le coffre et les places arrière d'un monospace. D'énormes progrès ont aussi été accomplis pour adapter ces technologies aux normes de sécurité les plus strictes.

Si les véhicules électriques dont on annonce la commercialisation immédiate stockent leur énergie au sein de batteries, l'option hydrogène et pile à combustible reste d'actualité pour optimiser l'autonomie de ces véhicules. Par exemple, le prototype 307CC FiSyPAC, développé par la Société Peugeot SA en collaboration avec le CEA, incorpore une batterie lithium-ion de 13 kilowattheures et une pile à combustible de 23 kilowatts ; il assure une autonomie de 500 kilomètres.

L'hydrogène est donc un vecteur énergétique prometteur. En permettant de stocker 33,3 kilowattheures d'énergie par kilogramme, il dépasse de plusieurs ordres de grandeur les matériaux des meilleures batteries au lithium. Rappelons aussi que, contrairement à aujourd'hui, le modèle énergétique à venir ne reposera pas sur une unique technologie. Dans le bouquet énergétique de l'après-pétrole, l'hydrogène sera un vecteur parmi d'autres, permettant par exemple le stockage des énergies solaire et éolienne et régulant ainsi l'approvisionnement en électricité.

Ainsi, peu à peu, l'hydrogène s'intègre dans le nouveau panorama des ressources énergétiques qui seront exploitées dans l'« ère de l'après-pétrole ». S'éclairer à l'hydrogène, rouler à l'hydrogène, ne sont sans doute plus hors de portée. On peut espérer que les progrès tant en recherche fondamentale qu'en développement en feront dès 2050 une solution énergétique incontournable. ■

La librairie SCIENCE

■ POUR LA

Le savoir scientifique au fil des pages...

NOUVELLE
ÉDITION
ENRICHIE



Les mathématiciens ■ Collectif

« Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kowalevskaja. D'Archimède à Jacques Hadamard, cet ouvrage dresse les portraits d'une vingtaine de mathématiciens, autant artistes que scientifiques.

280 pages • 24 euros • ISBN 978-2-8424-5109-7



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)... Au fil de ses billets d'humeur, Didier Nordon s'ingénie à bousculer les idées reçues.

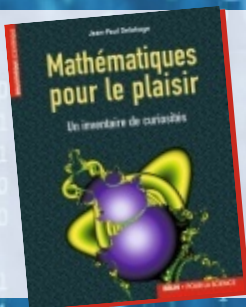
224 pages • 19 euros • ISBN 978-2-8424-5110-3



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

Les auteurs retracent un épisode fascinant et dramatique de la création mathématique. Sur les traces de chercheurs russes et français du XX^e siècle, ils nous éclairent sur les liens étroits entre science, religion et politique.

288 pages • 24 euros • ISBN 978-2-8424-5107-3



Mathématiques pour le plaisir ■ Jean-Paul Delahaye

Les mathématiques ne se réduisent pas – heureusement – à ce qu'on nous en apprend à l'école. Partout présentes, elles sont une source de joie et d'épanouissement pour celui qui sait y consacrer un peu d'attention et d'esprit ludique. Dans cet ouvrage, découvrez pourquoi les mathématiques sont faciles et comment s'y adonner est un plaisir.

208 pages • 25 euros • ISBN 978-2-8424-5104-2



La physique buissonnière ■ Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

Une plante plus rapide qu'une mouche, un tuyau qui parle, une cape qui rend invisible, etc. La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique, les auteurs vous invitent à une promenade sur des chemins de traverse pour comprendre cette physique du quotidien.

160 pages • 22 euros • ISBN 978-2-8424-5105-9

Des livres à découvrir en librairie et sur www.pourlascience.fr

De l'énergie issue de feuilles artificielles

La photosynthèse utilise la lumière du Soleil et l'eau pour produire de l'énergie. Pourrait-on imiter ce procédé naturel pour obtenir de l'hydrogène ?

Antonio Regalado

L'ESSENTIEL

✓ Les plantes produisent leur propre combustible chimique – du sucre – à partir de lumière solaire, d'air et d'eau, et sans émission nocive.

✓ Des chercheurs s'inspirent pour concevoir des feuilles artificielles qui transformeraient la lumière solaire et l'eau en combustible – l'hydrogène.

✓ La principale difficulté est le coût de telles structures. Des feuilles minces et souples fabriquées à l'aide de nanofils de silicium offriraient un compromis intéressant entre coût et rendement.

Les conférences de Nathan Lewis sur la crise énergétique sont à la fois terrifiantes et stimulantes. Pour éviter un réchauffement climatique mondial, déclare ce chimiste de l'Institut de Technologie de Californie (Caltech), il va falloir trouver un moyen de produire une puissance de plus de dix térawatts (10^{12} watts) à partir d'énergie propre, sans carbone, d'ici 2050. Ce niveau correspond à trois fois la demande énergétique moyenne des États-Unis, qui est de 3,2 térawatts. La France, quant à elle, a consommé 3 térawattheures d'énergie primaire en 2009, soit une puissance de 0,3 térawatt, dont elle a produit 20 à 25 pour cent : 88 pour cent sous forme d'énergie nucléaire, 5 pour cent sous forme d'énergie renouvelable – hydraulique, éolien et photovoltaïque –, et le reste sous forme d'énergie fossile – charbon, pétrole, gaz naturel.

Des barrages sur tous les lacs, fleuves et rivières de la planète ne fourniraient que cinq térawatts d'hydroélectricité. L'énergie nucléaire relèverait le défi, mais à condition qu'un nouveau réacteur soit construit tous les deux jours pendant les 50 prochaines années.

Pour N. Lewis, la solution est le Soleil, qui déverse sur Terre plus d'énergie en une heure que ce que l'humanité n'en consomme en une année. Plus précisément, des feuilles artificielles qui, à l'instar des

plantes vertes, capteraient les rayons du Soleil et produiraient, sur-le-champ, du combustible chimique. Nous pourrions alors brûler ce combustible, comme nous brûlons du pétrole ou du gaz naturel, pour faire rouler des automobiles, libérer de la chaleur ou produire de l'électricité, et nous stockerions ce combustible pour l'utiliser la nuit. Quels seraient les avantages de ces feuilles artificielles ? Et d'abord, en quoi consistent-elles ?

Une source d'énergie bio-inspirée ?

Dans plusieurs laboratoires, dont celui de N. Lewis, on travaille sur de telles feuilles prototypes : à peine plus grandes que des puces informatiques, ces feuilles sont conçues pour produire, à partir d'eau, de l'hydrogène (le combustible), au lieu du glucose que créent les végétaux par photosynthèse. Contrairement aux combustibles fossiles, l'hydrogène a une combustion propre puisque la réaction chimique ne libère que de l'eau, de l'oxygène et de l'énergie. D'autres chercheurs étudient des alternatives pour capter l'énergie solaire, telles que des organismes biologiques qui pourraient produire du pétrole, ou des algues optimisées pour produire des lipides – de l'huile – en grande quantité. Cette huile pourra être ensuite utilisée pour produire du diesel, comme on le fait déjà à partir de l'huile de colza. Toutes ces approches visent à transformer la lumière solaire en une énergie chimique stockable, transportable et facilement consommable – un combustible dit solaire. Cependant, pour N. Lewis, la feuille artificielle reste le projet le plus susceptible de



DES FEUILLES ARTIFICIELLES pourraient produire un combustible – de l'hydrogène – pour alimenter les automobiles et les centrales électriques.

fournir les énormes quantités d'énergie requises aujourd'hui.

Quelques prototypes de laboratoire ont déjà produit de petites quantités de combustible à partir de la lumière solaire. Néanmoins, cette technologie doit être améliorée pour que ce combustible soit fabriqué à grande échelle et à faible coût. Pour alimenter en énergie les États-Unis, estime N. Lewis, il faudrait fabriquer non pas des dispositifs discrets semblables à des puces, mais des films à combustible solaire fins et souples en quantité, qui sortiraient de leur chaîne de production aussi vite que les journaux quittent les rotatives. Ces films devraient être aussi bon marché que de la moquette et couvrir une surface de la taille de la Caroline du Sud (environ 80 000 kilomètres carrés).

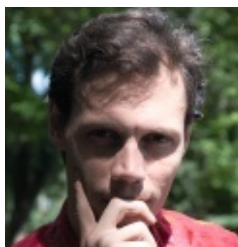
Loin d'être un rêve insensé, la technologie du combustible solaire a progressé par à-coups depuis que le président Jimmy Carter a donné un élan à la recherche de sources d'énergie alternatives lors des chocs pétroliers des années 1970. Actuellement, avec une nouvelle menace de crise énergétique et climatique, le combustible solaire retient l'attention. Selon Stenbjörn Styring, de l'Université d'Uppsala, en Suède, qui développe des systèmes artificiels imitant la photosynthèse, le nombre de consortiums travaillant sur ce sujet est passé de 2 à 29 depuis 2001.

En juillet dernier, le ministère de l'Énergie des États-Unis a alloué une somme de 85 millions d'euros sur cinq ans à une équipe de scientifiques de différents laboratoires, dirigée par N. Lewis, pour développer la technologie du combustible solaire, l'une des trois priorités de recherche sur les nouvelles énergies de cet organisme gouvernemental.

Du combustible à partir des photons

Comment, concrètement, fabriquer du combustible à partir de lumière solaire ? Lors de la photosynthèse, dans les feuilles vertes, l'énergie du rayonnement solaire est utilisée pour réarranger les liaisons chimiques de l'eau et du dioxyde de carbone, produire et stocker du combustible sous forme de glucose. Il s'agit de fabriquer un dispositif qui fonctionne aussi simplement qu'une feuille verte, mais qui produit une autre molécule. La feuille artificielle requiert ainsi deux éléments principaux : un capteur qui transforme l'énergie solaire

L'AUTEUR



Antonio REGALADO est journaliste scientifique.

(les photons) en énergie électrique (les électrons) et un électrolyseur qui utilise l'énergie des électrons pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Un catalyseur – un composé chimique ou un métal – est ajouté pour faciliter cette décomposition. Des cellules photovoltaïques produisent déjà de l'électricité à partir du rayonnement solaire, et des électrolyseurs sont utilisés dans divers procédés déjà commercialisés : le défi consiste à allier les deux pour constituer des films solaires performants et bon marché.

Des prototypes volumineux ont été développés pour montrer comment cette alliance fonctionnerait. Par exemple, des ingénieurs du constructeur automobile japonais *Honda* ont fabriqué une « boîte » plus haute qu'un réfrigérateur, recouverte

à combustible solaire devraient coûter moins de huit euros par mètre carré de surface captant la lumière et transformer dix pour cent de cette énergie en combustible chimique. Un matériau nouveau et adaptable, tel que des films fabriqués à partir de ressources bon marché, est donc nécessaire.

À la recherche du bon catalyseur

Malgré plusieurs décennies de travail, le coût des dispositifs conçus est encore loin des performances requises. En 1998, par exemple, John Turner, du Laboratoire américain de l'énergie renouvelable à Golden, dans le Colorado, a construit un dispositif de la taille d'une boîte d'allumettes qui, lorsqu'il est placé dans l'eau et exposé à la lumière solaire, produit de l'hydrogène et de l'oxygène : il est même 12 fois plus performant qu'une feuille naturelle. Toutefois, le système nécessite des matériaux rares et chers, dont le platine, qui catalyse la réaction. Selon une estimation, la pile à combustible solaire de J. Turner coûte sept euros par centimètre carré ! Un prix accessible pour des applications militaires ou satellitaires, mais invisable pour une utilisation à grande échelle. L'idéal serait de remplacer le platine par des minéraux bon marché tels que le fer, le cobalt ou le manganèse...

Une autre difficulté est due au fait que la réaction de décomposition de l'eau est très corrosive et dégrade les constituants du système. Dans les plantes, cette difficulté est levée par le fait que leur machinerie photosynthétique est en perpétuelle reconstruction. La pile à combustible solaire de J. Turner, elle, ne dure que 20 heures.

Aujourd'hui, le physicien consacre ses recherches à imaginer des catalyseurs toujours un peu moins chers et des capteurs de lumière fonctionnant toujours un peu plus longtemps. Mais ces recherches sont laborieuses.

D'autres équipes de chercheurs, dont celle dirigée par Daniel Nocera, de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), sont à la recherche de catalyseurs. En 2008, D. Nocera et un collègue ont découvert une combinaison bon marché de phosphate et de cobalt qui catalyse la production d'oxygène – une étape nécessaire de la réaction de décomposition de l'eau.

Même si ce dispositif prototype n'était qu'une pièce du puzzle – il reste encore à

de cellules photovoltaïques. À l'intérieur, un électrolyseur utilise l'électricité solaire pour décomposer les molécules d'eau. Cette boîte libère l'oxygène dans l'air ambiant, et compresse et stocke l'hydrogène restant ; *Honda* aimerait utiliser cet hydrogène pour recharger des voitures à piles à combustible.

Sur le principe, ce système a toutes les qualités requises pour résoudre le problème du réchauffement climatique mondial : seules la lumière solaire et l'eau sont nécessaires pour produire de l'énergie ; le sous-produit de la réaction est l'oxygène, et le produit de la combustion de l'hydrogène dans une pile à combustible est l'eau (voir l'article *L'hydrogène, une énergie propre pour demain ?*, page 26). En pratique, la situation est plus compliquée : les cellules solaires du commerce contiennent des cristaux de silicium, qui sont très coûteux. En outre, les électrolyseurs sont abondamment dopés au platine ; or ce métal noble, à ce jour le meilleur matériau pour catalyser la réaction de décomposition de l'eau, coûte 40 euros le gramme !

Par conséquent, la station d'hydrogène solaire de la Société *Honda* ne pourra jamais alimenter le monde en énergie. N. Lewis a calculé que, pour satisfaire la demande mondiale en énergie, les futurs dispositifs

POUR SATISFAIRE LA DEMANDE MONDIALE EN ÉNERGIE,
les futurs dispositifs à combustible solaire devront coûter moins de huit euros par mètre carré et transformer dix pour cent de l'énergie solaire captée en combustible.

BIBLIOGRAPHIE

S. W. Boettcher *et al.*, Energy-conversion properties of vapor-liquid-solid-grown silicon wire-array photocathodes, *Science*, vol. 327, pp. 185-187, 2010.

H. B. Gray, Powering the planet with solar fuel, *Nature Chemistry*, vol. 1, p. 7, 2009.

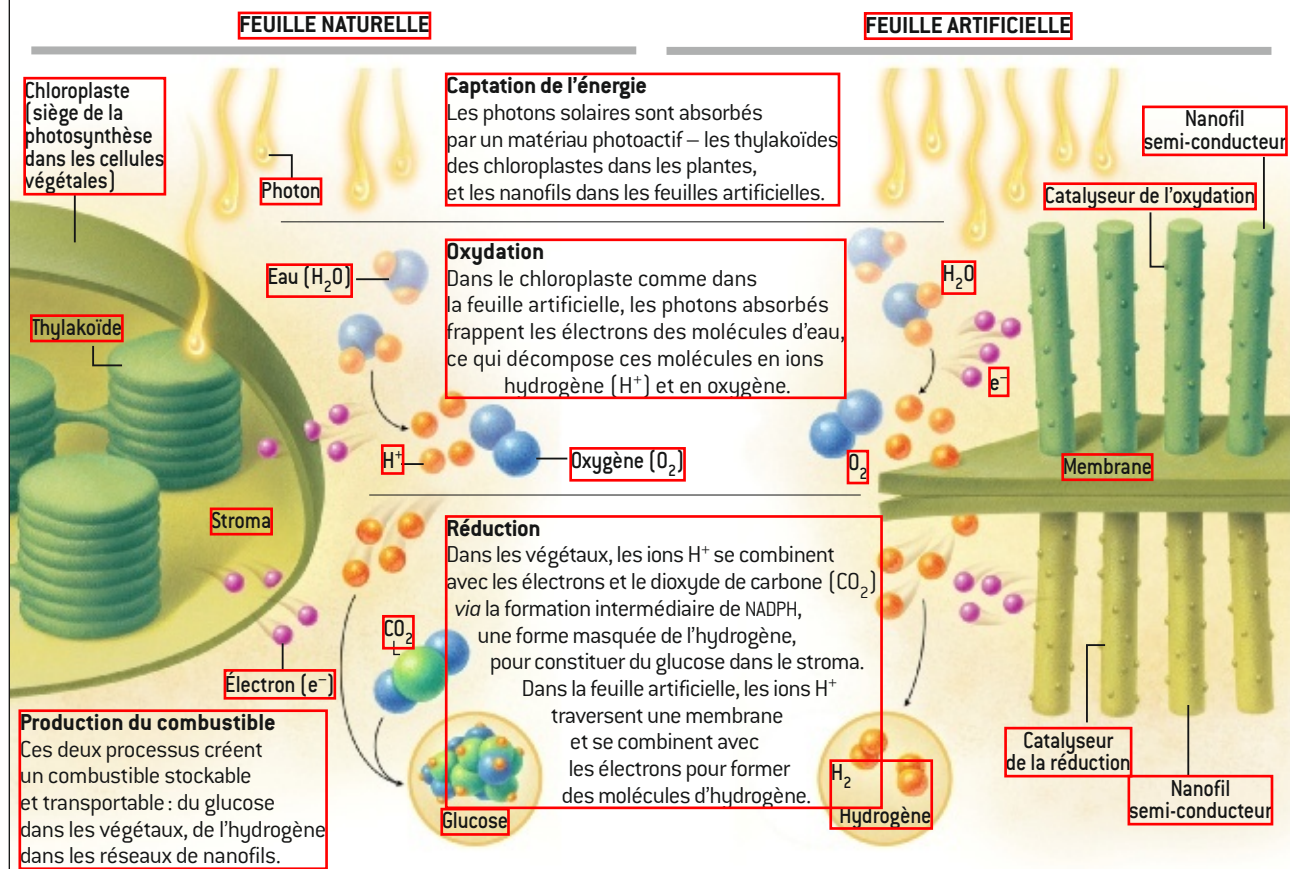
M. W. Kanan *et al.*, *In situ* formation of an oxygen-evolving catalyst in neutral water containing phosphate and Co^{2+} , *Science*, vol. 321, pp. 1072-1075, 2008.

N. S. Lewis et D. G. Nocera, Powering the planet : chemical challenges in solar energy utilization, *PNAS*, vol. 103, n° 43, pp. 15729-15735, 2006.

DES NANOFILS POUR IMITER LA PHOTOSYNTHÈSE NATURELLE

Les végétaux utilisent l'énergie solaire pour transformer le dioxyde de carbone et l'eau en glucose – un combustible chimique qu'ils consomment ou stockent (à gauche). Des chercheurs imaginent des feuilles artificielles qui captent la lumière

solaire pour décomposer les molécules d'eau en hydrogène et oxygène. L'équipe de Nathan Lewis, à l'Institut de technologie de Californie, a conçu une feuille couverte de nanofils en silicium qui pourrait produire de l'hydrogène (à droite).



trouver un meilleur catalyseur pour produire l'hydrogène –, le MIT l'a présenté comme un grand bond vers la photosynthèse artificielle. D. Nocera a même prédit qu'il serait bientôt utilisé dans les voitures à hydrogène. Ce n'est pas l'avis de certains experts, qui pensent que ce type de recherche demandera encore plusieurs décennies. D'autres sont plus optimistes : le Département américain de l'énergie et la Société *Polaris Venture Partners* financent les travaux en cours de D. Nocera dans la Société *Sun Catalytix*, à Cambridge, dans le Massachusetts.

Pendant ce temps, au Caltech, N. Lewis travaille sur la première étape de tout dispositif à combustible solaire : la captation des photons du Soleil et leur transformation en électricité. L'idée était de construire un système bien meilleur marché que les piles solaires à silicium cristallin actuellement utilisées. Il a conçu et fabriqué un capteur constitué de nanofils de sili-

cium enchâssés dans un film plastique transparent – une membrane échangeuse de protons – qui, à grande échelle, pourrait être « roulé et déroulé comme une moquette » (voir l'encadré ci-dessus). Ses nanofils transforment la lumière en énergie électrique avec un rendement de sept pour cent. C'est peu comparé aux 20 pour cent atteints par les piles solaires commercialisées. Mais si la production en quantité de ce matériau devient suffisamment bon marché, un rendement inférieur serait acceptable.

Quel combustible pour demain ?

Les chercheurs débattent aussi sur le choix du combustible à fabriquer : et si l'hydrogène n'était pas le meilleur ? Pour les équipes travaillant sur des organismes biologiques qui produisent des biocombustibles liquides, ces derniers sont plus faciles

à stocker et à transporter que l'hydrogène. Mais ce gaz s'adapte à divers usages : il peut être utilisé dans des voitures à piles à combustible, brûlé dans des centrales pour produire de l'électricité, et même servir à produire de l'essence synthétique. La clef du problème reste cependant de fabriquer un combustible chimique à fort rendement énergétique, avec le minimum d'émission de carbone.

La photosynthèse prouve que la lumière solaire peut être transformée en combustible avec seulement quelques éléments courants. L'humanité réussira-t-elle à imiter ce processus ? La réponse n'est pas claire. Quoi qu'il en soit, la société – y compris les responsables politiques, les organismes de financement gouvernementaux et même les scientifiques – n'a pas encore saisi l'ampleur du problème de l'énergie et la nécessité de trouver des solutions innovantes. Toutes les pistes prometteuses sont à explorer...

Neurosciences

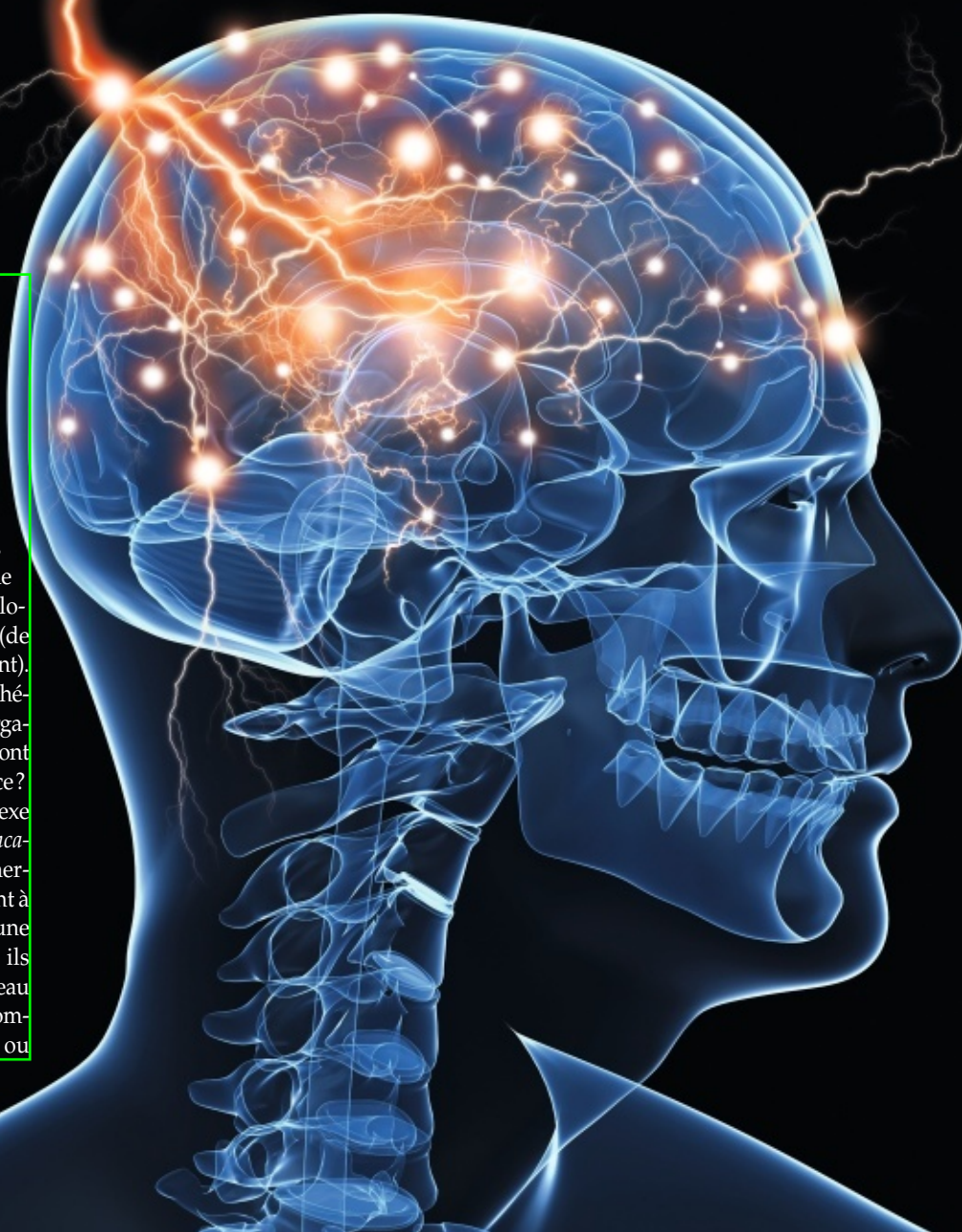
Les crises de la conscience

En observant comment la conscience est altérée lors de certaines crises d'épilepsie, les neuroscientifiques comprennent mieux son fonctionnement normal et découvrent des réseaux cérébraux impliqués.

Don Tucker
et Mark Holmes

Chaque seconde, notre cerveau reçoit des informations du monde qui nous entoure et nous en prenons conscience : nous savons ce que nous faisons et ce que nous avons fait. L'éveil est nécessaire à la conscience qui est un concept à multiples facettes présentant deux composantes majeures : la conscience de l'environnement et la conscience de soi. En outre, certains scientifiques proposent que pour être consciente, une expérience nécessite une diffusion globale de l'information dans le cerveau (de vastes réseaux de neurones y participent). Comment avons-nous conscience des phénomènes externes et internes à notre organisme, voire de notre existence ? Quels sont les supports neuronaux de la conscience ?

Si l'étude de la conscience est complexe et difficile à mettre en œuvre (voir l'encadré page 46), les neuroscientifiques cherchent quels événements neuronaux sont à la fois nécessaires et suffisants pour une expérience consciente. Pour ce faire, ils observent ce qui se passe dans le cerveau dans des situations conscientes et les comparent à des situations non conscientes, ou



ils étudient certaines lésions cérébrales pour déterminer leurs conséquences et en déduire la fonction des régions lésées.

Ainsi, c'est en examinant les « pertes » de conscience dont sont parfois victimes les personnes souffrant d'épilepsie que nous pouvons en partie comprendre le fonctionnement normal de la conscience. Nous avons en effet établi un lien entre deux types de crises d'épilepsie et la conscience, car ces crises ont pour conséquence une perte de la mémoire du présent et du contrôle volontaire des intentions.

Nous verrons que certains patients ayant des crises dites du lobe temporal perdent la mémoire du présent. Or cette dernière permet à l'homme d'utiliser le passé immédiat et d'anticiper le futur proche. Elle assure une continuité de la perception de soi et du monde qui nous entoure, c'est-à-dire de la conscience : chez ces patients, la composante temporelle de la conscience disparaît momentanément. Dans d'autres cas, pendant les crises nommées absences, le contrôle volontaire des intentions est perturbé. Le sujet n'a alors plus conscience de ce qu'il fait pendant quelques secondes, mais après la crise, il reprend son activité là où il l'avait arrêtée. Cette composante de la conscience est liée à l'intentionnalité, à savoir le fait d'agir volontairement dans un but précis.

Un débat classique en neurosciences est de savoir si les fonctions psychologiques, telles que la mémoire spatiale et le raisonnement, sont localisées dans des régions spécifiques du cerveau ou si elles naissent de l'activité globale du cerveau. Grâce aux techniques de neuro-imagerie telles que l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ou l'électroencéphalographie dite à haute densité (dEEG pour *dense-array electroencephalography*), il est désormais admis que de nombreuses tâches cognitives sont localisées dans des régions spécifiques du cerveau. En revanche, la conscience nécessite une diffusion globale de l'information dans de vastes réseaux de neurones. Dans ces conditions, existe-t-il malgré tout des régions spécifiques ?

Pour comprendre comment des fonctions psychologiques naissent de réseaux neuronaux, nous devons nous appuyer sur les modèles développés en intelligence artificielle. Ces derniers illustrent des principes de représentation répartie de l'information, proches d'une activité cérébrale d'ensemble. Un principe fondamental, nommé connexionnisme, sti-

pule que l'information est représentée dans les connexions entre neurones, et non dans les neurones. Un réseau serait formé d'unités simples – des groupes de neurones – interconnectées. De fait, les théoriciens en neuropsychologie ont créé de nouveaux concepts pour lier les caractéristiques complexes de l'esprit humain aux propriétés physiques et électriques des réseaux cérébraux.

La conscience émerge de vastes réseaux

Par exemple, Giulio Tononi, à l'Université du Wisconsin, et Christoph Koch, à l'Institut de technologie de Californie, ont développé une théorie selon laquelle la conscience émergerait de vastes réseaux englobant les deux hémisphères cérébraux. Un nombre considérable de connexions neuronales seraient alors actives en même temps, et G. Tononi et Ch. Koch énoncent que la conscience naîtrait de cette activité globale des connexions.

Qu'apportent les crises d'épilepsie à l'étude de la conscience ? Ces phénomènes pathologiques résultent d'une activité électrique anormale de certaines régions cérébrales qui perturbent le fonctionnement d'autres parties du cerveau ; ils mettent donc en évidence l'étendue des réseaux neuronaux. La façon dont les crises d'épilepsie se transmettent à certains réseaux et pas à d'autres indiquerait comment des ensembles dynamiques de neurones peuvent être formés dans des réseaux anatomiques différents. Ce qui permettrait de repérer certaines composantes fonctionnelles de la conscience. Mais voyons d'abord l'anatomie de ces réseaux neuronaux.

Chez l'homme, les opérations mentales résultent de l'organisation du cerveau des vertébrés, où les structures récentes sont empilées sur des structures plus primitives. Le cortex cérébral dépend du circuit principal du télencéphale sous-cortical, qui inclut notamment le système limbique, un ensemble de structures impliquées entre autres dans le traitement des émotions. Ces systèmes télencéphaliques reposent à leur tour sur le thalamus et l'hypothalamus dans le diencephale, qui se trouve au sommet du tronc cérébral (voir l'encadré page 43). Les fonctions du diencephale sont soutenues par les structures du tronc cérébral, qui régulent des aptitudes primitives et autonomes, mais essentielles, telles que la respiration, les battements du cœur et l'éveil.

L'ESSENTIEL

- ✓ Les neuroscientifiques cherchent les régions cérébrales sous-tendant la conscience ; pour ce faire, ils étudient certaines crises d'épilepsie qui s'accompagnent d'une altération de la conscience.
- ✓ Les crises du lobe temporal s'étendent dans les réseaux cortico-limbiques et engendrent une perte de la mémoire du présent.
- ✓ Les absences concernent les circuits fronto-thalamiques et perturbent le contrôle volontaire des intentions.
- ✓ Ces deux capacités seraient des composantes de la conscience.

© SCIENTIFIC WRITING / K. J. H. / A. J. H.

CERTAINES CRISES D'ÉPILEPSIE, dues à l'activation brutale et anormale d'un grand nombre de cellules nerveuses (ou « orage cérébral »), engendrent des « pertes » de conscience. On peut estimer le moment où apparaissent les crises, et localiser l'activité associée dans des régions spécifiques du cerveau. Ces données permettent aux scientifiques d'identifier certains réseaux cérébraux nécessaires à la conscience.

DIFFÉRENTES CRISES D'ÉPILEPSIE

Les crises d'épilepsie résultent d'une activité électrique anormale de certaines régions cérébrales qui perturbent le fonctionnement d'autres parties du cerveau. Les crises dites du lobe temporal peuvent provenir de l'hippocampe ou du cortex temporal latéral (*à gauche, en rouge*). Ces crises sont souvent suivies d'une perte de conscience ou d'un état « rêveur ». Les attaques durent une ou deux minutes, mais la désorientation peut se prolonger plusieurs heures et une perte de mémoire peut apparaître. Les absences, quant à elles, concernent davantage les enfants et proviennent du lobe frontal (*à droite en rouge*) ; elles peuvent apparaître des dizaines de fois par jour, et commencent et se terminent brusquement. Une fois la crise terminée, le sujet retrouve son activité normale.



CRISE DU LOBE TEMPORAL

- Associée à une confusion ou à une perte totale de la conscience ;
- Les automatismes sont fréquents : claquement de la langue, mastication, clignement des yeux, mouvements des bras et des jambes ou attitudes stéréotypées, mouvements des doigts inhabituels ;
- Le patient peut parler ;
- Le patient peut s'écrouler s'il est debout quand la crise survient ;
- La durée typique est de deux minutes ;
- Une perte de mémoire plus ou moins longue peut suivre la crise.



ABSENCE

- Perte de conscience ;
- Souvent associée à de petits mouvements du visage ou des battements de paupières ;
- Toute activité volontaire cesse, mais il n'y a pas de perte du tonus musculaire ;
- Pas de mouvement inhabituel ;
- La durée typique de chaque absence est inférieure à dix secondes ;
- Touche surtout les enfants (les deux tiers sont des filles), à un âge compris entre deux et dix ans avec un pic vers cinq à six ans.

S. HERNANDEZ

Certaines personnes souffrant d'épilepsie présentent des crises dites tonico-cloniques ou convulsions. C'est la forme la plus grave d'une crise d'épilepsie. Elle peut s'étendre à toute l'organisation du cerveau (télencéphale, diencéphale et mésencéphale), et a montré que les réseaux neuronaux les plus récents sont imbriqués dans des réseaux plus primitifs.

Toutefois, certaines crises concernent uniquement le diencéphale et le télencéphale. Celles qui ne s'étendent pas sont dites partielles. Si elles perturbent la conscience, ce sont des crises partielles complexes. Ces crises concernent notamment les réseaux limbiques des hémisphères cérébraux, centrés sur le lobe temporal médian (sur la face interne de chaque hémisphère à la hauteur des tempes) ; c'est pourquoi lorsque l'épilepsie implique des crises partielles, elle est souvent désignée sous le nom d'épilepsie du lobe temporal. C'est la forme d'épilepsie la plus courante chez les adultes.

Pour comprendre pourquoi les réseaux limbiques ont tendance à engendrer des crises d'épilepsie, des chercheurs ont déclenché des crises chez l'animal en stimulant électriquement certaines régions corticales. Ils ont montré que la réactivité des réseaux limbiques dans l'épilepsie traduit une forte excitabilité électrophysiologique, voire fonctionnelle, des aires concernées.

En effet, les réseaux limbiques sont très réactifs aux événements se déroulant n'importe où dans l'hémisphère cérébral, car ils occupent une position centrale... et ont un rôle central. Deepak Pandya et ses collègues, de l'Université de Boston aux États-Unis, ont étudié la connectivité du cortex cérébral des primates. Ils ont montré que la densité des connexions entre les aires corticales (par exemple, la connexion entre des aires primaires auditives et visuelles) augmente près du système limbique.

Le cerveau limbique

Les structures limbiques constituent les réseaux d'intégration essentiels des hémisphères cérébraux, que ce soit pour l'intégration sensorielle dans le cerveau postérieur ou pour l'organisation motrice dans le cerveau antérieur. Cette architecture expliquerait pourquoi les crises d'épilepsie ont tendance à impliquer les structures limbiques : ces dernières se trouvent au cœur de la connectivité du cortex.

La signification fonctionnelle de cette architecture est illustrée par le rôle de l'interaction cortico-limbique dans la formation des souvenirs. La mémorisation résulte de l'interaction des réseaux néocorticaux (la couche la plus externe des hémisphères cérébraux), par exemple ceux qui

contrôlent les fonctions sensorielles ou motrices, avec les réseaux limbiques, au centre du cerveau. Des preuves provenant d'études cliniques sur l'homme et d'expériences sur l'animal ont montré que si les connexions entre le néocortex – par exemple le cortex auditif – et le cortex limbique (le cortex cingulaire et le cortex orbitofrontal) sont interrompues, les souvenirs concernés – par exemple la mémoire des sons – ne sont pas formés. Des souvenirs antérieurs peuvent être rappelés (selon la gravité de la lésion cérébrale), mais de nouveaux souvenirs ne peuvent être créés.

En conséquence, les souvenirs ne sont pas localisés en un endroit précis, mais sont répartis dans de multiples réseaux, comprenant le cortex limbique, le cortex associatif (des régions du cortex impliquées dans des opérations complexes de traitement de l'information) et le cortex primaire (par exemple le cortex auditif). En outre, pour former un souvenir, un mécanisme physiologique, nommé consolidation, est nécessaire pour que la perception d'un événement engendre des réactions dans le cortex limbique. Ces réactions sont alors renvoyées (on ignore comment) pour stimuler la trace mnésique, qui est répartie dans les réseaux cortico-limbiques.

Les réseaux limbiques sont aussi impliqués dans la motivation. Leur rôle dans la consolidation mnésique serait de faire en sorte que les expériences motivantes soient retenues en mémoire. Mais cette excitabilité des circuits limbiques qui les fait « résonner » avec des expériences significatives les rendrait également plus sensibles aux crises d'épilepsie.

Nous l'avons déjà mentionné, l'épilepsie chez l'homme implique souvent les réseaux temporo-limbiques. Certains chercheurs pensent même que les crises d'épilepsie répétées progresseraient toujours vers la région temporale, quelle que soit leur origine dans le cortex. Chez l'animal, on a stimulé électriquement et de façon répétée une région du néocortex ; la première stimulation ne provoquait qu'une décharge locale, mais les stimulations ultérieures amplifiaient la réponse, qui conduisait à des décharges diffuses, semblables à celles d'une crise d'épilepsie. Et quel que soit le lieu de départ de cette amplification, ces décharges avaient tendance à se propager vers le système limbique.

Il y a quelques années, l'équipe de Jerri Janowski, de l'Université des sciences et

de la santé de l'Oregon, à Portland, aux États-Unis, a découvert une association entre cette amplification électrique et l'apprentissage. Elle a montré chez l'animal que les crises pouvaient être conditionnées ou apprises *via* une association avec un stimulus sensoriel, tel un son. La « résonance » limbique impliquée dans le déclenchement d'une crise d'épilepsie semble similaire, voire identique, à celle participant à la consolidation d'un souvenir.

La mémoire du présent

Si les crises du lobe temporal perturbent les réseaux de la mémoire, qu'arrive-t-il à la mémoire d'une personne après une crise ? Le sujet présente une amnésie rétrograde : la perte de la mémoire touche les minutes ou même les heures qui ont précédé la crise. À cause de cette perte de la mémoire récente, la personne est désorientée et incapable d'agir de façon cohérente. Elle ignore où elle se trouve et ce qui s'est passé. C'est ainsi que l'on a identifié un facteur clé de la conscience, la cohérence temporelle.

Étant donné le rôle des réseaux temporo-limbiques dans la mémoire, on peut s'attendre à ce que les crises qui affectent le plus ces circuits provoquent une perte importante de la mémoire récente. Dans le cas de Drane, de l'Université de Washington, et ses collègues ont montré que c'est effectivement le cas : les crises du lobe temporal modifient la mémoire récente de façon plus importante que les autres types de crises.

Nous pensons que ce trouble de la mémoire récente accompagnant les crises du lobe temporal fournit un indice neurophysiologique d'un aspect important de la conscience : la mémoire du présent. Sans la continuité de cette mémoire et la capacité associée d'anticiper le futur immédiat, la dimension temporelle de la conscience se dissout. Imaginez que vous ne vous souveniez pas de ce qui s'est passé il y a une seconde. Êtes-vous encore conscient ? Certes, vous êtes conscient de cette seconde précise, et vous pourriez soutenir que la conscience immédiate est préservée. Toutefois, une certaine portée « historique » de la prise de conscience est nécessaire, et sans elle, la « temporalité » de la conscience disparaît.

Admettant que les réseaux limbiques de la mémoire sont nécessaires pour que le lobe frontal puisse planifier les actions futures, le neuroscientifique suédois David

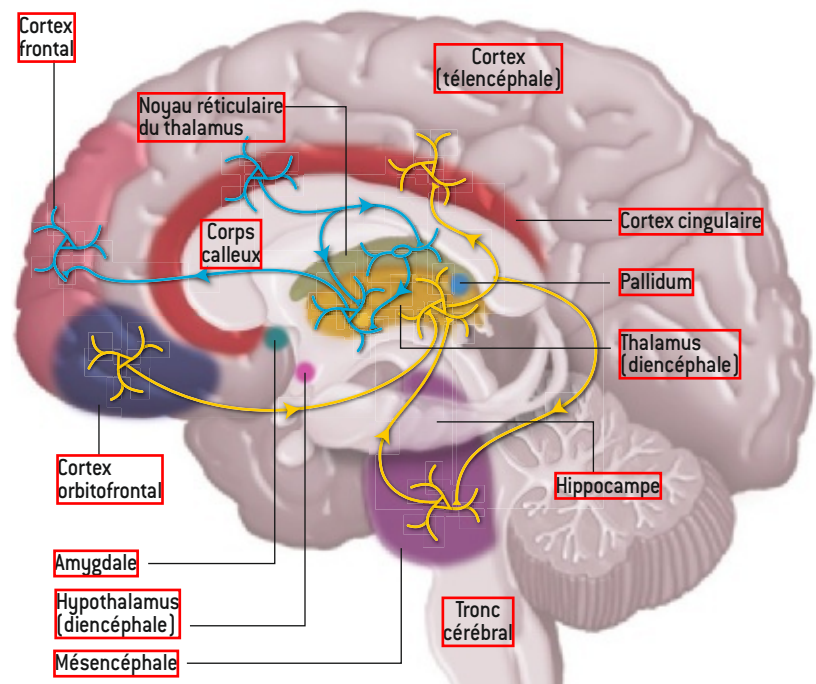
Ingvar décrivait cette planification comme « la mémoire du futur ». De même, constatant que les hémisphères cérébraux s'articulent autour des réseaux limbiques, le biologiste américain Gerard Edelman a décrit la conscience comme « le présent remémoré ». Et en considérant que la conscience requiert à la fois le contexte de la mémoire récente et la projection d'événements dans le futur, nous suggérons que la mémoire du présent est une composante essentielle de la conscience.

Comme le montrent divers troubles de la conscience – les crises du lobe temporal, mais aussi les délires et les démences –, la perte de la mémoire du présent détruit le contrôle conscient de la cogni-

tion. Quand la mémoire récente « rétrécit », l'anticipation consciente du futur aussi. La mémoire du présent nous permet de nous repérer par rapport aux personnes, aux lieux et au temps. Nous projetons sans cesse les événements récents dans le futur proche, maintenant ainsi la continuité de notre mémoire.

Une analyse des effets des crises du lobe temporal fournit un nouvel aperçu de l'activité neuropsychologique qui coordonne la conscience dans le temps. Mais cet aperçu peut être précisé si l'on compare les crises du lobe temporal avec un autre trouble de la conscience – les absences – provoqué par un type de crises qui ne détériore pas la mémoire du présent.

CONSCIENCE ET RÉSEAUX CÉRÉBRAUX



Les différentes divisions cérébrales (le mésencéphale, le diencéphale et le télencéphale) apparaissent au cours du développement dans un ordre qui suit les principales étapes du développement neuronal des vertébrés. Une coupe du cerveau humain adulte montre le cortex et le tronc cérébral, le thalamus et l'hypothalamus étant situés au centre. Le cortex dépend du circuit principal du télencéphale sous-cortical, qui inclut les circuits limbiques (les cortex cingulaire et orbitofron-

tal, l'amygdale, l'hippocampe) et ceux des ganglions de la base (le striatum et le pallidum entre autres). Et ces systèmes télencéphaliques sont liés à leur tour au thalamus et à l'hypothalamus dans le diencéphale. Les réseaux cortico-limbiques regroupent des structures diverses d'origine télencéphalique, diencéphalique et mésencéphalique qui sont interconnectées (neurones jaunes). On y distingue des structures sous-corticales (l'hypothalamus, des noyaux du thalamus, le mésent-

céphale) et le cortex limbique incluant le cortex orbitofrontal et le cortex cingulaire. En outre, un circuit nerveux complexe relie le cortex frontal et le thalamus (neurones bleus). Les projections thalamiques vers le cortex sont régulées par le noyau réticulaire du thalamus, lui-même contrôlé par le cortex frontal. L'existence de ce circuit fronto-thalamique s'est révélée importante pour interpréter l'activité de certaines crises épileptiques, où la conscience est altérée.

LES AUTEURS



Don TUCKER est professeur de psychologie et directeur associé du Centre de neuro-informatique à l'Université de l'Oregon, aux États-Unis.

Mark HOLMES, professeur de neurologie à l'Université de Washington, dirige le Laboratoire de neurophysiologie électroencéphalographique et clinique au Centre médical Harborview de Seattle.

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

BIBLIOGRAPHIE

Dans le dédale des mémoires, *L'Essentiel Cerveau & Psycho*, n° 6, mai-juillet 2011.

S. Kouider, *Neurobiological theories of consciousness*, *Encyclopedia of Consciousness*, Elsevier, vol. 2, pp. 87-100, 2009.

G. Tononi et C. Koch, *The neural correlates of consciousness: an update*, *Annals of the New York Academy of Science*, vol. 1124, pp. 239-261, 2008.

D. M. Tucker et al., *Discharges in ventromedial frontal cortex during absence spells*, *Epilepsy and Behaviour*, vol. 11, pp. 546-557, 2007.

M. D. Holmes et al., *Are « generalized » seizures truly generalized ? Evidence of localized mesial frontal and frontopolar discharges in absence*, *Epilepsia*, vol. 45, pp. 1568-1579, 2004.

Bien qu'elles puissent se poursuivre à l'âge adulte, les crises d'absence touchent surtout les enfants. La conscience est momentanément perturbée : l'individu est « inerte », sans intention, et incapable d'effectuer la moindre action. Cependant, contrairement à la perte de conscience que l'on observe lors d'un évanouissement ou d'une commotion cérébrale par exemple, la personne ne s'effondre pas, semble être alerte et n'est pas désorientée. Durant la crise, le cerveau émet d'importantes décharges, dites à pointe-onde, d'après le motif qu'elles prennent sur l'électroencéphalogramme (voir l'encadré page ci-contre). Toutefois, juste après cette crise en général brève, la personne peut poursuivre son activité antérieure ou reprendre sa conversation là où elle s'était arrêtée (elle n'est pas désorientée dans le temps).

L'absence épileptique est donc une perturbation spécifique de la conscience qui n'engendre pas une altération de la mémoire. Or les absences impliquent des circuits neuronaux du thalamus et du lobe frontal. Ces derniers seraient essentiels au contrôle volontaire et intentionnel de la pensée et de l'action.

Plusieurs données suggèrent que des décharges anormales provenant du thalamus apparaissent durant les crises à pointe-onde chez les animaux et lors des absences épileptiques. Le thalamus est une sorte de passerelle vers le cortex cérébral, reliant les réseaux dédiés à diverses fonctions mentales. Excepté le sens de l'odorat, toutes les voies sensorielles et motrices entrent ou sortent du cortex *via* des relais thalamiques, et le thalamus est capable de bloquer la transmission dans ces relais.

Une structure particulière du thalamus, le noyau réticulaire du thalamus, est une couche cellulaire qui entoure la plus grande partie du thalamus, telle une coquille. Ce réseau inhibe les relais thalamo-corticaux. Mais les systèmes d'autorégulation du cerveau sont complexes : le noyau réticulaire thalamique est lui-même sous contrôle cortical, à partir de réseaux spécifiques du cortex orbitofrontal.

L'existence d'un réseau de contrôle du lobe frontal régulant les mécanismes thalamiques s'est révélée importante pour interpréter l'activité des absences épileptiques. En observant par électroencéphalographie à haute densité les décharges pathologiques lors des absences, nous avons découvert que, même si l'on pensait que ces décharges couvraient de vas-

tes régions, les « pointes » étaient localisées : elles sont cantonnées aux réseaux orbitofrontaux qui régulent le thalamus. Elles traduisent donc une anomalie de l'activité physiologique des lobes frontaux, qui se propage en cascade le long des circuits fronto-thalamiques.

La décharge corticale affecterait le noyau réticulaire thalamique et le thalamus, et perturberait le contrôle thalamique du cortex lui-même. Cette boucle de rétroaction aboutirait à une décharge à pointe-onde. Comme les patients ne contrôlent plus leurs actes ou leurs pensées pendant une telle crise, quel est le lien entre cette « anatomie » des absences et les mécanismes de l'attention – le fait de concentrer ses ressources mentales sur un objet, un fait ou un individu – ou ceux de l'intention – le fait d'agir volontairement dans un but précis ?

De l'attention à l'intention

Récemment, Basilis Zikopoulos et Helen Barbas, de l'Université de Boston, ont trouvé comment le lobe frontal contrôle les mécanismes thalamo-corticaux de l'attention ; ils ont montré que des voies provenant de réseaux frontaux sur la surface latérale atteignent les régions du noyau réticulaire qui contrôlent les noyaux sensoriels du thalamus. Ces circuits interviennent dans l'attention en permettant au thalamus de mettre en avant certaines données sensorielles tandis que d'autres restent en arrière-plan.

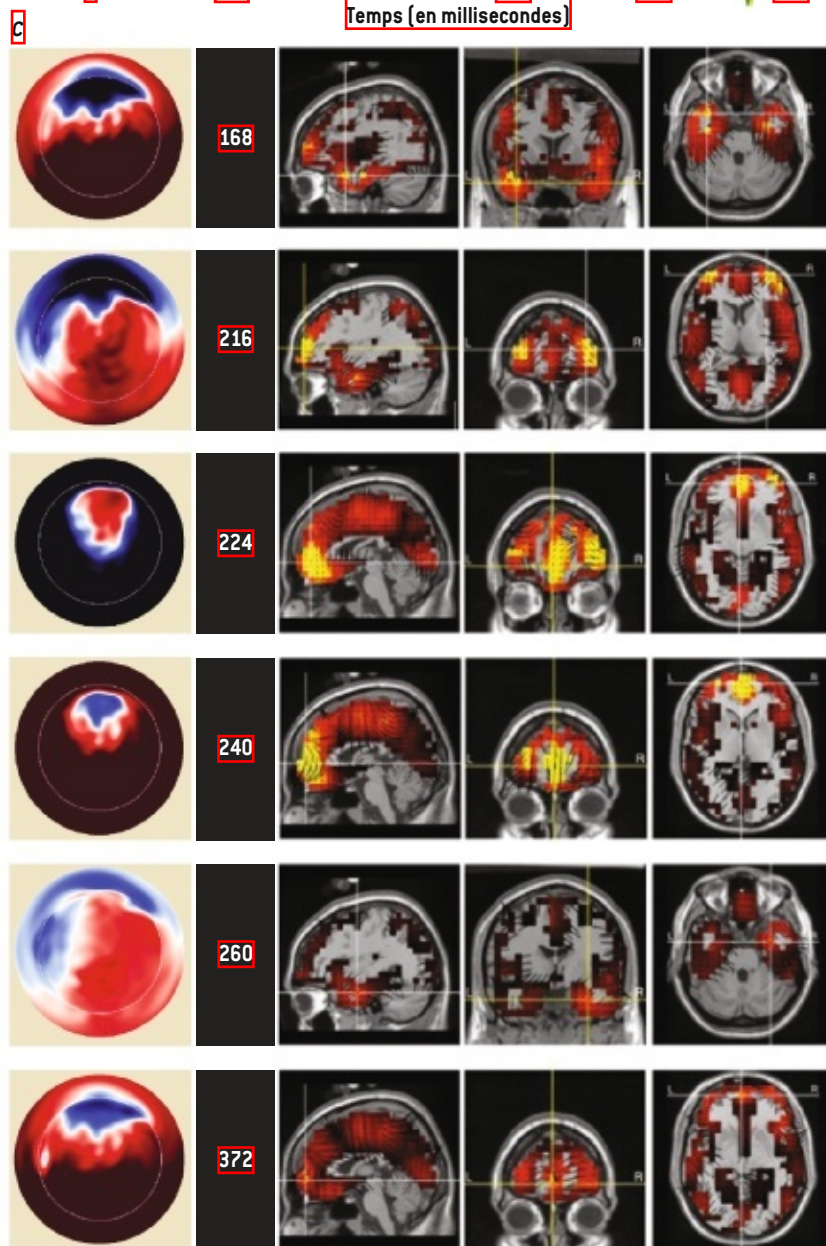
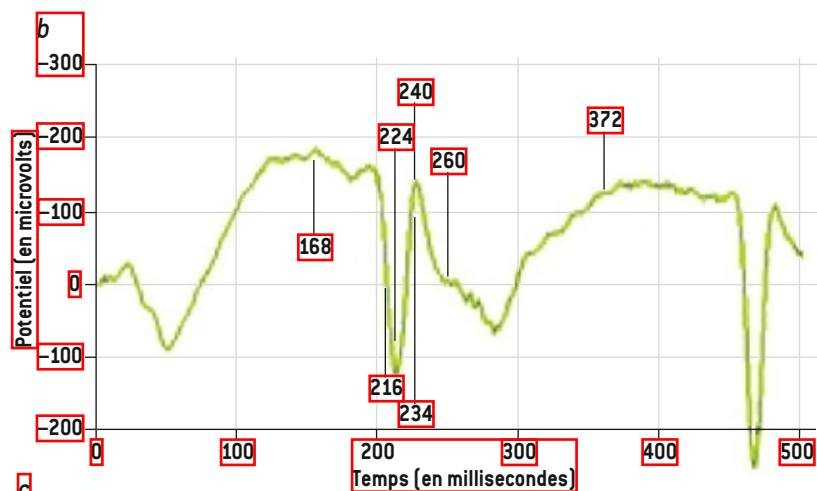
Cependant, les absences épileptiques n'engageraient pas ces réseaux frontaux latéraux qui régulent l'attention. En fait, nous avons découvert que les pointes de ces décharges concernent les pôles frontaux médians ; B. Zikopoulos et H. Barbas ont montré que ces réseaux sont connectés au noyau réticulaire thalamique, qui se projette sur les noyaux antérieurs du thalamus, nommés le thalamus limbique. Ce circuit fronto-thalamique, qui ne contrôle pas l'attention, participerait aux mécanismes de l'intention (ou de la motivation), qui reflètent les objectifs d'un individu.

Ainsi, nous pensons que la perte de conscience lors des absences traduit une altération d'un circuit fronto-thalamique essentiel au contrôle volontaire de l'intention. Ce n'est pas l'attention sélective pour un événement particulier qui est alors perturbée. Les absences épileptiques modifient une composante spécifique de la conscience.

L'électroencéphalographie (EEG) à haute densité permet l'enregistrement de l'activité cérébrale en tout point de la surface du crâne au moyen de centaines d'électrodes (256 dans le dispositif présenté en a). Ces points fournissent un enregistrement précis des signaux électriques émis par le cerveau et permettent d'obtenir une bonne estimation de l'origine de ces signaux dans le cerveau, avec une résolution temporelle de l'ordre de la milliseconde. Ainsi, on peut localiser et étudier une crise d'épilepsie, par exemple les absences ou crises d'épilepsie dite à pointe-onde.

L'activité électrique associée à chaque phase d'une crise d'épilepsie à pointe-onde (b) est enregistrée par électroencéphalographie à haute densité. Une carte colorée de la surface du crâne est ensuite reconstruite : le rouge est un potentiel électrique positif, le bleu est négatif (c, à gauche). Comme la résolution spatiale de cette technique est assez faible (car les signaux sont recueillis sur le crâne), les sources des signaux sont « reconstruites » et l'on peut coupler la technique avec des images d'imagerie par résonance magnétique pour chaque intervalle de temps : on localise de cette façon l'activité cérébrale (c, à droite).

Ainsi, les absences épileptiques concernent les pôles frontaux (en jaune, intervalle 216 par exemple) et médians (intervalle 224 par exemple) du cerveau ; ces réseaux sont connectés au noyau réticulaire thalamique qui se projette sur les noyaux antérieurs du thalamus (intervalle 224 par exemple). Ce circuit fronto-thalamique participe aux mécanismes de l'intention (ou de la motivation), qui reflètent les objectifs d'un individu.



L'étude de la conscience : difficultés et progrès

La conscience est un domaine scientifique à part entière. Les chercheurs estiment qu'en étudiant les mécanismes neurophysiologiques et les structures cérébrales, ils comprendront comment et pourquoi on est conscient. Toutefois, il s'agit d'un domaine scientifique assez jeune qui a débuté il y a moins de 20 ans ; née de l'interaction de philosophes, psychologues et neuroscientifiques, l'étude de la conscience n'en est qu'à ses balbutiements, mais a déjà permis des progrès notables dans la caractérisation des liens entre cerveau et pensée.

Alors que parler de conscience était surtout réservé aux discussions métaphysiques, voire ésotériques, faire de celle-ci une science « sérieuse » n'a pas été facile. En effet, une approche neurobiologique de la conscience se doit de résoudre un problème difficile, celui de comprendre la relation entre états subjectifs et structures neuronales. Même s'ils adhèrent à cette approche rigoureuse, les chercheurs parlent encore de mécanismes neuronaux faisant « surgir » la conscience, d'« émergence » de la conscience ou encore du cerveau qui « crée » la conscience.

C'est un peu comme si la conscience s'apparentait à un esprit immatériel qui émergerait par magie du cerveau. Comme le remarquait le biologiste et philosophe britannique Thomas Huxley, il y a plus d'un siècle, considérer qu'un état de conscience puisse avoir lieu simplement en « excitant » des neurones est aussi dérangeant qu'accepter qu'un Djinn puisse surgir d'une lampe merveilleuse dans l'histoire d'Aladin. S'abstraire du dualisme de Descartes, où corps et esprit étaient dissociés, constitue encore l'un des défis majeurs en neurosciences cognitives.

Les neuroscientifiques ont cependant trouvé un moyen de lever cette difficulté intrinsèque à l'étude de la conscience. Sous l'impulsion de Francis Crick, codécouvreur de l'ADN, et de son étudiant Christoph Koch, une nouvelle approche dite des « corrélats neuronaux de la conscience » est apparue dans les années 1990. Celle-ci offre l'avantage de relier – ou corréler – les états subjectifs et les états mentaux, sans avoir à les fusionner ni même à établir de rapport de causalité. En conséquence, il s'agit de déterminer quelle est la différence

entre les processus neuronaux qui « corréleront » et ceux qui « ne corréleront pas » avec la conscience. On cherche donc les mécanismes ou événements neuronaux qui sont nécessaires et suffisants pour une expérience consciente. Pour ce faire, les scientifiques observent ce qui se passe dans le cerveau dans des situations dites conscientes, et les comparent à des situations dites non conscientes (lorsqu'il y a une perte de conscience par exemple).

Cette approche présente aussi l'avantage de s'abstraire d'une autre difficulté : l'absence de définition concrète de la conscience. En effet, nous ignorons comment et pourquoi nous sommes conscients. Cependant, nous savons « quand » la conscience est présente. Dès lors, en considérant la conscience comme une variable et en comparant des situations où elle est permise à celles, dites non conscientes, où elle disparaît, il est possible d'étudier à la fois sa spécificité fonctionnelle et ses caractéristiques neuronales. Les progrès techniques en imagerie par résonance magnétique et en électrophysiologie ont contribué à cette démarche, permettant aux scientifiques de vi-

sualiser directement le cerveau ou l'activité des neurones impliqués dans une tâche cognitive.

Aujourd'hui, ces travaux ont montré que, dans le cerveau, l'implication des régions sous-corticales et des régions corticales sensorielles (par exemple le cortex visuel) n'est pas suffisante pour qu'il y ait une expérience consciente de l'environnement. En revanche, la perception consciente mettrait surtout en jeu les régions frontales du cerveau et leurs interactions avec le cortex sensoriel, via une synchronisation des décharges neuronales (l'activité électrique de neurones est la même, en même temps). Il y a encore débat sur le fait de savoir si l'activation du cortex préfrontal est nécessaire et suffisante à l'établissement d'une expérience consciente ; mais aujourd'hui, on admet que la conscience dépend de l'activité simultanée de vastes réseaux de neurones ; elle reposerait sur une dynamique globale des connexions neuronales à longue distance dans le cerveau.

Sid Kouider,

Laboratoire de sciences cognitives et de psycholinguistique, École normale supérieure, Paris

l'intention, qui permet à différentes opérations mentales d'être regroupées en une expérience orientée vers un but.

Des fragments de conscience ?

Toutefois, lors des absences, la mémoire du présent reste intacte. Cela suggère un fractionnement de la conscience. Les crises du lobe temporal détériorent la mémoire du présent pendant longtemps, de sorte que même quand la conscience revient, elle est incomplète. Les absences perturbent la conscience en altérant la volonté d'agir, mais sans dégrader la continuité de la mémoire du présent ; la personne peut donc reprendre une conversation là où elle en était restée. En fractionnant la conscience, les absences soulignent bien la spécificité de ce qui est perdu (l'intention) et de ce qui est conservé (la mémoire du présent).

Les altérations de la conscience apparaissant lors des crises d'épilepsie peuvent

fournir des indices sur les mécanismes qui relient la conscience aux réseaux corticaux. La conscience du présent dans un contexte donné nécessite le fonctionnement de réseaux cortico-limbiques. D'ailleurs, quand un patient semble confus, les médecins et les psychologues utilisent un test clinique de compétence mentale qui évalue la conscience du présent. Le praticien teste la perception qu'a le sujet de lui-même (« Quel est votre nom ? »), du lieu (« Pouvez-vous me dire où vous vous trouvez ? ») et du temps (« Quel jour sommes-nous ? »). En effet, un délire peut obscurcir temporairement la conscience et une démence peut la désorganiser de façon permanente. À l'inverse, le contrôle volontaire de la conscience implique des circuits fronto-thalamiques, que ce soit pour les mécanismes de l'attention ou ceux de l'intention (seuls ces derniers étant altérés lors des absences).

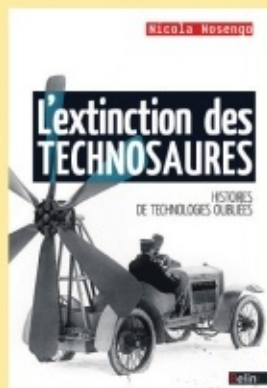
En conséquence, les réseaux cortico-limbiques et fronto-thalamiques seraient

tous deux nécessaires à la conscience. Or la plupart des gens considèrent la conscience comme une caractéristique indivisible et subjective. Cependant, l'altération de la conscience lors des absences épileptiques renforce l'hypothèse selon laquelle certains aspects de la volonté, dépendant de circuits fronto-thalamiques, peuvent être dissociés de la mémoire du présent.

D'un point de vue clinique, la compréhension des mécanismes neuronaux des crises d'épilepsies pourrait conduire à un meilleur diagnostic et à des thérapies mieux ciblées, qu'elles soient médicamenteuses ou chirurgicales. D'un point de vue scientifique, séparer les composantes neurophysiologiques de la conscience est nécessaire pour clarifier les fonctions des réseaux cérébraux à grande échelle. Et d'un point de vue philosophique, n'est-ce pas opportun de pouvoir disséquer la conscience en plusieurs composantes fonctionnelles, plutôt que d'admettre qu'elle est une caractéristique indivisible de l'esprit ? ■

La sélection **POUR LA SCIENCE**

Des livres scientifiques à la pointe de l'actualité



L'extinction des technosaures

Histoires de technologies oubliées

Nicolas Nosengo

Pourquoi le standard vidéo Betamax a-t-il été supplanté par le VHS ? Que serait devenu notre quotidien si Giovanni Caselli avait connu le succès au XIX^e siècle avec son « pantélégraphe », l'ancêtre du fax ? Ce livre conte l'histoire de toutes ces inventions mort-nées, ces « technosaures » que l'évolution n'a pas sélectionnés. Une passionnante réflexion sur le progrès technologique ...

978-2-7011-5353-7 • 256 p. • 19,50 €



L'histoire controversée du test ADN

Entre crimes, mystères et batailles légales

Alice Andreoli

Le test de l'ADN est la plus grande révolution dans l'investigation criminelle. Mais en quoi cela consiste ? Est-il vraiment infaillible ? Le présent ouvrage retrace l'histoire de la découverte et de la mise au point de ce test à travers des centaines de cas judiciaires, de grandes énigmes et légendes du passé qui ont pu enfin trouver une solution grâce à son apparition.

978-2-7011-5589-0 • 256 p. • 19,50 €



D. Jamet et F. Mottez

978-2-7011-5351-3 • 240 p. • 19,50 €



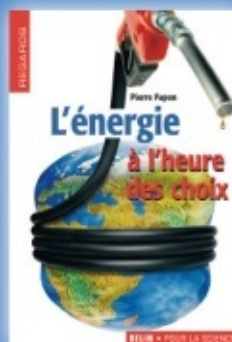
V. Tardieu

978-2-7011-4909-7 • 352 p. • 21,90 €



P. Feillet

978-2-7011-4950-9 • 192 p. • 18,50 €



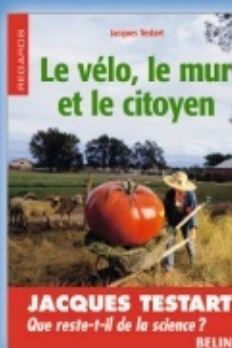
P. Papon

978-2-7011-4443-6 • 256 p. • 21,90 €



R. Rizzo

978-2-7011-4362-0 • 176 p. • 17,50 €



J. Testart

978-2-7011-4367-5 • 128 p. • 17,50 €



A. Nicolas

978-2-7011-4469-6 • 160 p. • 23,50 €



A. Nicolas

978-2-7011-3859-6 • 192 p. • 24,00 €

Feuilletez les premières pages de notre sélection de livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.pourlascience.fr



Les gélules robots

Paolo Dario et Arianna Menciassi

Un voyage dans le corps humain n'est plus du domaine de la science-fiction. De minuscules « robots » pourraient bientôt aider au diagnostic, effectuer des interventions chirurgicales et administrer des médicaments.

En 1966, quand le film *Le voyage fantastique* est sorti sur les écrans, il n'était que pure science-fiction ; des médecins miniaturisés voyageaient dans les vaisseaux sanguins d'un patient pour réparer son cerveau. Mais 20 ans après, des ingénieurs commencent déjà à fabriquer des prototypes de la taille d'une gélule qui pouvaient se déplacer dans le tube digestif d'un patient. Et c'est en 2000 que des personnes ont avalé pour la première fois des caméras en forme de gélules. Depuis, les médecins utilisent souvent ces capsules qui prennent des images de l'intérieur du corps humain, tels les replis de l'intestin grêle, ces régions étant difficiles à voir sans intervention chirurgicale.

Aujourd'hui, ce film reste en grande partie du domaine de la science-fiction : on ne sait pas encore fabriquer des gélules caméras se déplaçant à leur guise, atteignant une tumeur pour faire une biopsie, surveillant l'inflammation dans l'intestin grêle, ou administrant des médicaments pour traiter un ulcère. Toutefois, ces dernières années, les progrès ont été considérables : les chercheurs ont transformé une gélule caméra en un véritable robot miniature. Des prototypes complexes, actuellement testés chez l'animal, sont équipés de pattes, d'hélices,

d'objectifs photographiques et de systèmes de déplacement sans fil. Bientôt, ces robots devraient être prêts pour être évalués lors d'essais cliniques. En attendant, ils permettent de tester les limites de la robotique miniaturisée.

La première gélule caméra sans fil, M2A, présentée par la Société israélienne *Given Imaging*, et les modèles ultérieurs ont établi l'intérêt d'un examen du tube digestif avec un dispositif sans fil. Les capsules vidéo-endoscopiques sont aujourd'hui utilisées en routine en médecine. Mais l'absence totale de contrôle externe engendre un nombre élevé de faux négatifs : les caméras peuvent omettre des régions de l'organisme où il y a un problème, ce qui est inacceptable pour un outil de diagnostic. Cette nouvelle façon d'observer l'intérieur de l'organisme a deux objectifs : la confirmation d'une maladie et l'exploration minutieuse d'un organe ou d'un tissu soupçonné d'être anormal ; un médecin doit donc pouvoir arrêter la caméra et la manœuvrer pour observer la région qui l'intéresse.

La transformation d'une capsule passive en un dispositif actif fiable pour un examen gastro-intestinal nécessite d'ajouter des appendices, qui guideraient la gélule dans l'organisme ou manipuleraient les tissus. Afin que l'on puisse pilo-

ter ces bras mobiles, les données doivent être transmises au chirurgien qui doit recevoir en temps réel les images et envoyer les instructions adéquates. En effet, ces capsules seraient de minuscules robots capables de réagir vite à des ordres. Tous ces composants doivent rester actifs environ 12 heures (temps de déplacement d'un objet dans le tube digestif) et ont donc besoin d'énergie. Et l'ensemble doit entrer dans une gélule de deux centimètres cubes, qu'un patient peut facilement avaler.

Contrôler et déplacer la gélule sans fil

En 2000, quand la gélule M2A faisait ses débuts, l'*Intelligent Microsystem Center* (IMC) de Séoul, en Corée du Sud, lançait un projet sur dix ans pour développer une nouvelle génération d'endoscopes en capsules. Ces gélules robots devraient disposer de capteurs et d'une source de lumière pour fournir des images. Elles auraient des outils permettant la délivrance de médicaments et la réalisation de biopsies. Et elles pourraient se déplacer, en étant contrôlées sans fil par un médecin. D'autres sociétés et groupes de recherche se sont lancés dans ce domaine. Par exemple, 18 équipes



L'ESSENTIEL

✓ Les gélules caméras permettent de voir l'intérieur du tube digestif, mais leur utilisation et leur précision restent limitées.

✓ Aujourd'hui, on développe des gélules robots actives : elles disposent de « bras », d'outils chirurgicaux, et peuvent être contrôlées sans fil. Leurs déplacements dans l'organisme sont précis.

✓ La miniaturisation de composants robotiques pour accomplir différentes tâches dans le corps humain reste un défi technique.

européennes ont formé un consortium avec l'IMC : les scientifiques mettent au point des capsules robots pour la détection et le traitement de tumeurs.

Notre équipe, à l'École supérieure Sant'Anna de Pise, en Italie, sous la direction médicale de Marc Schurr à Tübingen en Allemagne, est responsable de la coordination scientifique et technique de ce projet. Il se nomme VECTOR (*Versatile Endoscopic Capsule for gastrointestinal TumOR Recognition and therapy*), le projet visant à créer une capsule endoscopique polyvalente pour l'identification et le traitement des tumeurs gastro-intestinales.

Ces groupes universitaires et industriels ont proposé diverses solutions au problème principal, à savoir le contrôle du déplacement des gélules dans l'organisme. La plupart des solutions reposent sur une ou deux approches fondamentales. La première impose de diriger le mouvement de la capsule avec des « actionneurs » embarqués, c'est-à-dire des parties mobiles telles que des pales, des pattes ou autres dispositifs de propulsion intégrés dans la coque et capables de se déployer quand la gélule est dans le tube digestif. Les actionneurs, contrôlés par des moteurs miniatures, permettent le plus souvent de diriger la capsule, mais, dans certains cas, les bras articulés peuvent aussi écarter les tissus autour de la capsule ; l'examen ou le passage dans une section rétrécie de l'intestin sont alors facilités.

Beaucoup d'énergie

Les moteurs et les transmissions, tels les engrenages, sont grands comparés au volume d'une gélule ; l'ajout d'autres parties essentielles – le capteur pour fournir des images ou un outil de biopsie – pose problème. De plus, pour distendre un tissu, une capsule doit exercer une force importante, correspondant à 10 à 20 fois son poids. Cet effort suppose que les moteurs aient des couples élevés, et donc une puissance importante (environ un demi-watt). Cette consommation d'énergie est contraignante (pour les batteries), ce qui limite la durée de fonctionnement des robots.

Comment économiser l'énergie des batteries ? Il ne faudrait utiliser les actionneurs que pour la propulsion et trouver d'autres façons de distendre les tissus. Par exemple, l'absorption d'un demi-litre d'eau juste avant d'avaler une gélule contrôlée par une hélice distend l'estomac

pendant 20 minutes (puis le liquide s'écoule dans l'intestin grêle). Pendant ce temps, la gélule pourrait examiner la paroi de l'estomac.

Les besoins en énergie des actionneurs ont conduit certains chercheurs à développer une autre approche : l'application de champs magnétiques, créés à l'extérieur de l'organisme par des électroaimants, qui commandent sans fil le mouvement des capsules. En 2005, les sociétés *Olympus* et *Siemens* ont présenté un système de guidage magnétique de leur gélule caméra. Le dispositif engendre une rotation de la gélule ; ce mouvement en tire-bouchon produit un léger frottement qui permet à la capsule de « creuser » dans les replis du tube digestif.

Bien que l'utilisation d'électroaimants contrôlant une capsule endoscopique dans l'intestin soit simple, il est difficile de diri-

ger la gélule avec fiabilité. Les champs magnétiques perdent de la puissance avec la distance, et, avec la géométrie irrégulière de l'intestin, des modifications soudaines de l'intensité du champ magnétique peuvent faire bouger au hasard la capsule ou interrompre le contrôle magnétique. En pratique, à cause de cette instabilité, un opérateur peut perdre tout contact avec la gélule et être incapable de la retrouver. On pourrait améliorer le contrôle et la stabilité en ajoutant des électroaimants, mais au prix d'un encombrement plus important du système.

Étant donné les limites de ces deux approches, interne et externe, qui commandent les mouvements de la gélule, nous avons combiné ces méthodes et trouvé une solution indolore qui fournit des diagnostics fiables. Un contrôle magnétique externe permet de localiser

grossièrement la gélule dans l'intestin ; et des actionneurs semblables à des pattes modifient sa position et optimisent l'angle de vue de la caméra.

Des robots hybrides

Nous avons conçu une telle gélule hybride, avec quatre pattes actionnées par des moteurs, et l'avons testée chez le cochon, dont les intestins ont les mêmes dimensions que ceux de l'homme. Les pattes sont repliées lorsque la capsule est avalée et durant la plus grande partie de son voyage dans le tube digestif. Un générateur de champ magnétique externe, placé près de l'abdomen de l'animal, guide la capsule. Quand celle-ci atteint une partie de l'intestin où les parois se sont affaissées, elle soulève le tissu alentour avec les pattes pour pouvoir continuer son chemin.

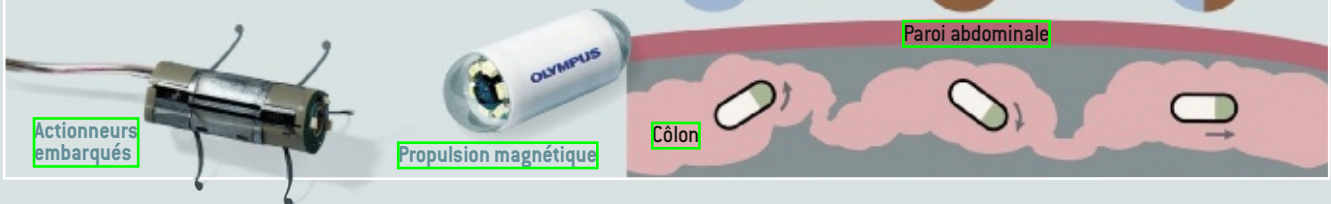
DES MINIROBOTS ACTIFS DANS LE TUBE DIGESTIF

Pour fabriquer des robots miniatures fonctionnant dans le tube digestif, les ingénieurs doivent trouver les moyens de commander sans fil leur déplacement et les mouvements des outils qu'ils embarquent. Et ils doivent placer ces outils (les camé-

ras et la batterie par exemple) dans une gélule suffisamment petite pour qu'un patient puisse l'avaler. Voici quelques exemples des fonctions de ces robots minuscules et les techniques mises en œuvre.

Se déplacer

Les mouvements des robots endoscopiques peuvent être commandés soit par des actionneurs embarqués, tels des pattes, des pales, des hélices ou des appendices semblables à des cils, soit par des champs magnétiques engendrés à l'extérieur du corps du patient.



Distendre des tissus

Une façon d'écarter les tissus – pour libérer un passage ou obtenir une image – est de doter le robot de bras puissants qui peuvent exercer une poussée. Une méthode consommant moins d'énergie consiste à faire boire de l'eau au patient : le liquide distend le tube digestif et permet à une capsule propulsée par des hélices de « naviguer ».

Capsule dotée de bras

Capsule « navigant » avec des hélices



Soigner

Une capsule peut transporter différents outils : une caméra spectroscopique qui voit sous la surface d'un tissu ; une pince pour faire une biopsie du tissu ; ou un réservoir qui contient une dose de médicament.



Dans la plupart des régions de l'intestin grêle et du côlon, un système de locomotion hybride suffirait aux médecins pour qu'ils puissent faire un examen visuel détaillé. Mais des situations différentes exigent des solutions différentes. Par exemple, le projet VECTOR a développé trois types de gélules destinés seulement à l'intestin grêle : une capsule caméra passive pour un examen classique ; une gélule de diagnostic, dotée d'un système de locomotion actif et d'un capteur d'imagerie spectroscopique qui détecte des anomalies de la surface du tissu ; et la troisième capsule VECTOR prévue transporterait le même capteur spectroscopique et un outil de biopsie. Ce dernier prélèverait un échantillon de tissu et le stockerait dans la capsule ; puis les médecins le récupéreraient quand la capsule sortirait de l'organisme du patient.

La capacité de faire des biopsies et d'autres gestes thérapeutiques plus complexes, telle une ablation, ferait de ces gélules robots des outils exceptionnels. Mais plusieurs difficultés restent à résoudre : la faible puissance embarquée disponible et les contraintes d'espace et de couples moteurs. Avec une unique gélule de deux centimètres cubes, il est pour l'instant impossible d'atteindre des objectifs thérapeutiques plus ambitieux, qui nécessiteraient des mouvements compliqués et de multiples actionneurs.

S'auto-assembler dans l'organisme

En conséquence, nous travaillons sur un nouveau concept : des robots chirurgicaux qui s'assemblent eux-mêmes dans l'organisme. Voyons de quoi il s'agirait. Le sujet boirait un liquide distendant l'estomac, puis avalerait jusqu'à 10 à 15 gélules. Chacune serait un composant miniaturisé, avec des électroaimants à chaque extrémité. Une fois dans l'estomac, ces capsules, guidées par le chirurgien de l'extérieur, s'assembleraient automatiquement pour former la structure souhaitée.

Un chirurgien utiliserait alors ce robot assemblé comme un outil sans fil : il pourrait opérer sans avoir besoin de faire la moindre incision externe. L'acte chirurgical terminé, les liaisons magnétiques entre les capsules seraient reconfigurées ou rompues, ce qui permettrait aux différentes parties d'être éliminées par les selles. Nous avons fabriqué un premier prototype constitué de capsules de deux centimètres cubes environ, motorisées et télécommandées. Chaque capsule pourrait porter un capteur, par exemple une caméra ou des instruments chirurgicaux spécialisés.

Les composants robotiques miniaturisés pourraient aussi avoir d'autres fonctions. Les systèmes de contrôle et les caméras mis au point pour les capsules vidéo-endoscopiques influencent déjà d'autres techniques biomédicales, tels les endoscopes classiques et les dispositifs utilisés pour les laparoscopies (l'examen de l'intérieur de l'abdomen). Au-delà des soins médicaux, on constate une tendance à la miniaturisation et à la commande sans fil de robots multifonctionnels. Les gélules robots serviront sans doute d'exemples pour d'autres machines utilisées dans de tout autres domaines.



UNE GÉLULE HYBRIDE GUIDÉE par des électroaimants externes se déplace dans le côlon d'un cochon, en utilisant ses pattes pour ajuster sa position et repousser le tissu environnant.

Opérer à distance

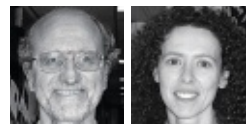
On peut étendre la gamme des tâches que peuvent effectuer les gélules robots en les concevant de sorte qu'elles s'auto-assemblent dans l'organisme. Le patient avalerait une douzaine de gélules ; dans l'estomac, ces gélules s'assembleraient pour former un robot. Les chirurgiens contrôleraient ce dispositif à distance, sans fil. Lorsque l'acte chirurgical serait terminé, le robot se scinderait en capsules, qui passeraient sans difficulté dans le tube digestif.

Une configuration chirurgicale possible



Frank Huston

LES AUTEURS



Paolo DARIO et Arianna MENCIASSI sont professeurs de robotique biomédicale à l'École supérieure Sant'Anna de Pise, en Italie.

BIBLIOGRAPHIE

K. Harada et al., *Wireless reconfigurable modules for robotic endoluminal surgery*, *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japon, 2009.

P. Valdastris et al., *Wireless therapeutic endoscopic capsule : in vivo experiment*, *Endoscopy* 2008, vol. 40, pp. 979-982, 2008.

A. Moglia et al., *Wireless capsule endoscopy : from diagnostic devices to multipurpose robotic systems*, *Biomedical Microdevices*, vol. 9, pp. 235-243, 2006.

Un démon de Maxwell pour REFROIDIR LES ATOMES

Mark Raizen

Une expérience de pensée du XIX^e siècle inspire une technique permettant de manipuler des atomes afin de les ralentir et d'abaisser leur température à des valeurs proches du zéro absolu.

L'ESSENTIEL

✓ Les méthodes usuelles pour refroidir les gaz à une température proche du zéro absolu ne fonctionnent que pour certains éléments.

✓ En combinant deux nouvelles techniques, on peut refroidir des atomes de presque tous les éléments, voire certaines molécules.

✓ Un canon magnétique « inversé » ralentit d'abord les atomes. On poursuit le refroidissement par une technique inspirée du « démon de Maxwell », imaginé vers 1870.

✓ Les applications vont de l'étude des propriétés des particules élémentaires à la séparation d'isotopes.

Pendant que vous lisez ces lignes, des molécules filent autour de vous à 3000 kilomètres par heure, vous bombardant de tous côtés, tandis que les atomes et molécules dont vous êtes constitué virevoltent, vibrent et entrent sans cesse en collision. Dans la nature, rien n'est parfaitement immobile: tout bouge en permanence. Et plus les atomes et les molécules vont vite, plus ils portent de l'énergie. Cette énergie collective et désordonnée, nous la ressentons à notre échelle sous forme de chaleur.

Le repos total, correspondant à la température du zéro absolu (zéro kelvin, soit $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), est physiquement impossible. Pourtant, les scientifiques s'approchent de plus en plus de cette limite. Dans ces conditions extrêmes, d'étranges effets quantiques se manifestent. En parvenant à refroidir un gaz d'atomes jusqu'à une petite fraction seulement au-dessus du zéro absolu, les physiciens ont pu observer la matière se comporter comme une onde et concevoir des appareils de mesure de plus en plus précis.

Les techniques de refroidissement les plus répandues ne sont applicables qu'à

un nombre restreint d'éléments du tableau périodique de Mendeleïev, ce qui limite leur utilisation. Ainsi, refroidir l'hydrogène, le plus simple de tous les atomes, a longtemps donné du fil à retordre aux physiciens. La nouvelle méthode de refroidissement que mon équipe a mise au point parvient désormais à refroidir très efficacement la plupart des éléments, tout comme de nombreuses molécules.

Pour relever ce défi technique, je me suis inspiré du physicien écossais du XIX^e siècle, James Clerk Maxwell, auteur d'une expérience de pensée dans laquelle il a théorisé l'existence d'un « démon » violant les lois de la thermodynamique...

Ce démon constitue la base d'une technique inédite de cryogénie. De nouvelles voies de recherche s'ouvrent et conduisent à de nombreuses applications. On pourrait purifier des isotopes rares, utiles en médecine comme en recherche fondamentale. Ce « superfroid » contribuerait à l'amélioration des méthodes de fabrication des puces électroniques à l'échelle nanométrique, et à la conception d'horloges atomiques encore plus précises. Côté recherche, le refroidissement extrême



Kiam Vochies

d'atomes et de molécules peut engendrer de nouveaux états de la matière, éclairant les terres inconnues séparant la physique quantique de la chimie ordinaire. On espère aussi démêler les différences entre matière et antimatière.

Une fuite d'atomes vers le vide

Immobiliser puis manipuler des atomes et des molécules n'est pas une mince affaire. Généralement, les chercheurs commencent par produire un gaz raréfié constitué d'un certain élément chimique, en chauffant un solide ou en le vaporisant à l'aide d'un laser. Le gaz est ensuite ralenti, puis confiné dans une chambre à vide où il est maintenu à distance des parois.

J'ai commencé par utiliser une astuce bien connue. Il y a plus de 40 ans, les chimistes ont découvert que lorsqu'un gaz comprimé à une pression de plusieurs bars émerge dans le vide par un petit trou, il se dilate brusquement et subit un refroidissement rapide. Or ces « jets supersoniques » sont presque monoénergétiques. En d'autres termes, les molécules ont des éner-

gies, donc des vitesses, très proches de la moyenne du jet.

Dans l'air, à température ambiante, les molécules ont une vitesse moyenne de 3 000 kilomètres par heure, mais se déplacent à des vitesses comprises entre 0 et 6 000 kilomètres par heure. À l'opposé, dans un jet supersonique de même vitesse moyenne, les molécules ont une vitesse qui ne s'écarte pas de plus de 30 kilomètres par heure de la valeur moyenne. Du point de vue thermodynamique, ce faisceau rapide, porteur d'une quantité importante d'énergie, est extrêmement froid. Pourquoi ? Imaginez que vous vous déplaçiez avec le jet, à 3 000 kilomètres par heure. Vous verriez les molécules voisines se déplacer lentement (au plus à 30 kilomètres par heure) par rapport à vous : la température à l'intérieur du jet serait donc à peine de un centième de degré au-dessus du zéro absolu !

Je me suis rendu compte que si nous parvenions à ralentir et à stopper un tel jet tout en préservant le faible étalement des vitesses, nous obtiendrions un ensemble d'atomes très froids. En le piégeant, nous pourrions le refroidir encore davantage.

Mon équipe a commencé à étudier les jets d'atomes supersoniques en 2004, avec Uzi Even, chimiste à l'Université de Tel-Aviv en Israël. Notre première idée a été de diriger un tel faisceau sur les extrémités des pales d'un rotor. Quand un atome du gaz entre en contact avec la pale du rotor en mouvement, celle-ci prélève une partie de son énergie cinétique. Si les extrémités des pales tournent à une vitesse égale à la moitié de la vitesse du faisceau de gaz supersonique, toute l'énergie cinétique de ce dernier est captée : les atomes du jet s'arrêtent, comme peut le faire une balle de tennis frappant une raquette qui recule.

Ce dispositif, qui nécessite des réglages d'une extrême finesse, était difficile à mettre en œuvre. Robert Hebner, directeur du Centre d'électromécanique de l'Université du Texas à Austin, nous a alors suggéré un concept un peu différent : les atomes du gaz rebondiraient non pas sur une pale de rotor, mais sur l'arrière d'un projectile catapulté par un canon magnétique.

Un tel appareil est constitué d'une série de bobines de fil de cuivre parcourues par un courant électrique. Chaque bobine crée un champ magnétique qui attire le projectile aimanté venant la traverser, de sorte que le projectile est accéléré. Mais une fois le centre dépassé, les forces magnétiques commencent à le tirer en arrière. Afin d'éviter cela, le courant de chaque bobine est coupé au moment exact où le projectile passe par son centre ; il est alors attiré par le champ produit par la bobine suivante. Ainsi, les forces magnétiques tirent toujours le projectile dans la même direction, vers l'extrémité du canon.

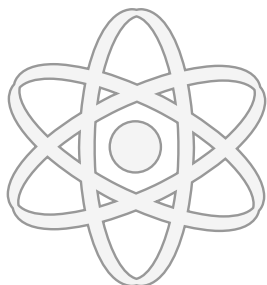
J'ai vite compris que nous pouvions retenir l'idée de R. Hebner, mais en nous débarrassant du projectile. Le principe s'appliquerait alors au jet lui-même, mais à l'envers : au lieu d'accélérer un projectile, les bobines du canon agiraient directement sur les molécules du jet, afin de les ralentir et les immobiliser (voir l'encadré page 59). Cette astuce nécessite que les atomes du gaz aient un petit moment magnétique. Or c'est le cas de tous les éléments quand leurs électrons sont placés dans un état excité ; de nombreuses molécules ont elles aussi un moment magnétique.

Nous avons construit un tel dispositif de freinage magnétique, et l'avons testé sur des atomes de néon excités, puis sur des molécules de dioxygène (O_2). Nous avons réussi par cette technique à immobiliser ces deux espèces. Simultanément,

L'AUTEUR



Mark RAIZEN est titulaire de la chaire Sid W. Richardson de physique à l'Université du Texas à Austin, aux États-Unis.



sans que nous le sachions, une autre équipe dirigée par Frédéric Merkt, à l'Institut de technologie (ETH) de Zurich, en Suisse, a développé la même idée, parvenant à immobiliser des atomes d'hydrogène. Aujourd'hui, plusieurs groupes à travers le monde ont construit de tels canons magnétiques : ce sont des équipements robustes et néanmoins très simples, constitués de fil de cuivre ordinaire, de transistors et de condensateurs disponibles dans le commerce.

Les atomes du gaz ralentis, il est relativement facile de les piéger à l'aide de champs magnétiques statiques. Si la température atteinte – de l'ordre de 0,01 kelvin (un centième de degré au-dessus du zéro absolu) – peut sembler très basse, elle est encore loin des limites atteintes par d'autres techniques. Nous devons trouver un moyen de refroidir davantage les atomes.

Des portes à sens unique

Pendant longtemps, je n'ai pas vu de solution à ce problème technique. Le refroidissement laser, inventé dans les années 1980, a été un grand succès. Il a permis d'accéder à un nouvel état de la matière, le condensat de Bose-Einstein, et a donné lieu à deux prix Nobel de physique, en 1997 et en 2001. Mais le refroidissement laser s'applique principalement aux éléments de la première colonne du tableau périodique, les éléments alcalins tels le sodium ou le potassium. Il est en effet facile de faire passer ces atomes de leur état fondamental à un état excité unique, comme le nécessite cette technique.

J'ai également envisagé une autre approche, le refroidissement par évaporation, qui consiste à «écumer» les atomes les plus chauds afin de ne conserver que les plus froids. Mais sans refroidissement laser, il est très difficile d'obtenir une densité d'atomes assez élevée pour amorcer l'évaporation.

En février 2004, en visite à l'Université de Princeton, dans le New Jersey (États-Unis), j'ai pu discuter avec Nathaniel Fisch, physicien des plasmas (des gaz d'électrons et d'ions positifs). Il venait de développer un système créant un courant électrique dans le plasma par le déplacement d'électrons dans un sens unique. Je me suis demandé s'il était possible de faire circuler de la même façon des atomes ou des molécules à sens uni-

que. Il faudrait construire une «porte» qui laisserait entrer les atomes dans un sens, mais leur interdirait de sortir.

Laissons de côté pour le moment l'aspect technique de la construction d'une telle porte unidirectionnelle et expliquons pourquoi ce dispositif refroidirait un gaz. Dans un premier temps, il faut réduire le volume du gaz sans augmenter sa température. Supposez qu'une barrière divise un récipient en deux volumes. Les atomes du gaz, qui rebondissent aléatoirement dans le récipient, viennent frapper la porte à un moment ou à un autre. Si celle-ci les laisse passer dans un sens uniquement (par exemple de la gauche vers la droite), tous les atomes se retrouveront à la fin dans la partie droite du récipient.

Il est important de noter que les vitesses des atomes ne changent pas lors de cette étape de tri. Ainsi, le gaz enfermé dans la partie droite aura la même température qu'au départ. D'un point de vue thermodynamique, la procédure est très différente d'une compression du gaz dans un volume deux fois plus petit, où les atomes sont accélérés par le piston : dans ce cas, la température du gaz augmente.

Dans un second temps, on retire la porte. Le gaz se dilate et reprend son volume initial. Or quand un gaz se dilate, sa température décroît (c'est pourquoi les bombes d'aérosol se refroidissent lors de leur utilisation). À la fin, le gaz occupe le même volume qu'au départ, mais sa température est plus basse.

Une telle procédure, si elle paraît simple, a longtemps troublé les physiciens : imaginer une porte capable de trier les atomes en fonction de leur direction semble violer les lois physiques. En effet, lorsque le gaz se retrouve confiné dans la partie droite du récipient, il a une entropie inférieure (l'entropie reflète le désordre d'un système donné). Or d'après le deuxième principe de la thermodynamique, il est impossible d'abaisser l'entropie d'un système sans dépenser de l'énergie et produire davantage d'entropie ailleurs.

Ce paradoxe a suscité la controverse dès sa formulation par Maxwell en 1871. Le physicien écossais proposait de faire intervenir un «être intelligent aux mains agiles», capable d'observer les allées et venues des particules, ouvrant et fermant la porte en fonction de leur mouvement. Ce «démon de Maxwell» hypothétique semblait violer le deuxième principe de la thermodynamique, puisqu'il parvient à

diminuer l'entropie du gaz en opérant un tri intelligent, tout en dépensant une quantité négligeable d'énergie.

Un démon voleur d'entropie

Près de 60 ans plus tard, en 1929, Leó Szilárd, physicien hongaro-américain, a résolu ce paradoxe. Selon lui, afin de prendre la décision d'ouvrir ou de fermer la porte, le démon de Maxwell doit recueillir de l'information. Laquelle information, précisait-il, est porteuse d'entropie. Ainsi, la diminution d'entropie du gaz est exactement compensée par l'entropie prélevée par le démon sous forme d'information : le deuxième principe de la thermodynamique est sauf. Cette intuition place Szilárd en avance sur son temps : l'idée selon laquelle l'information a une réelle signification physique, et qu'elle est étroitement liée à l'entropie, est en partie à l'origine des sciences de l'information.

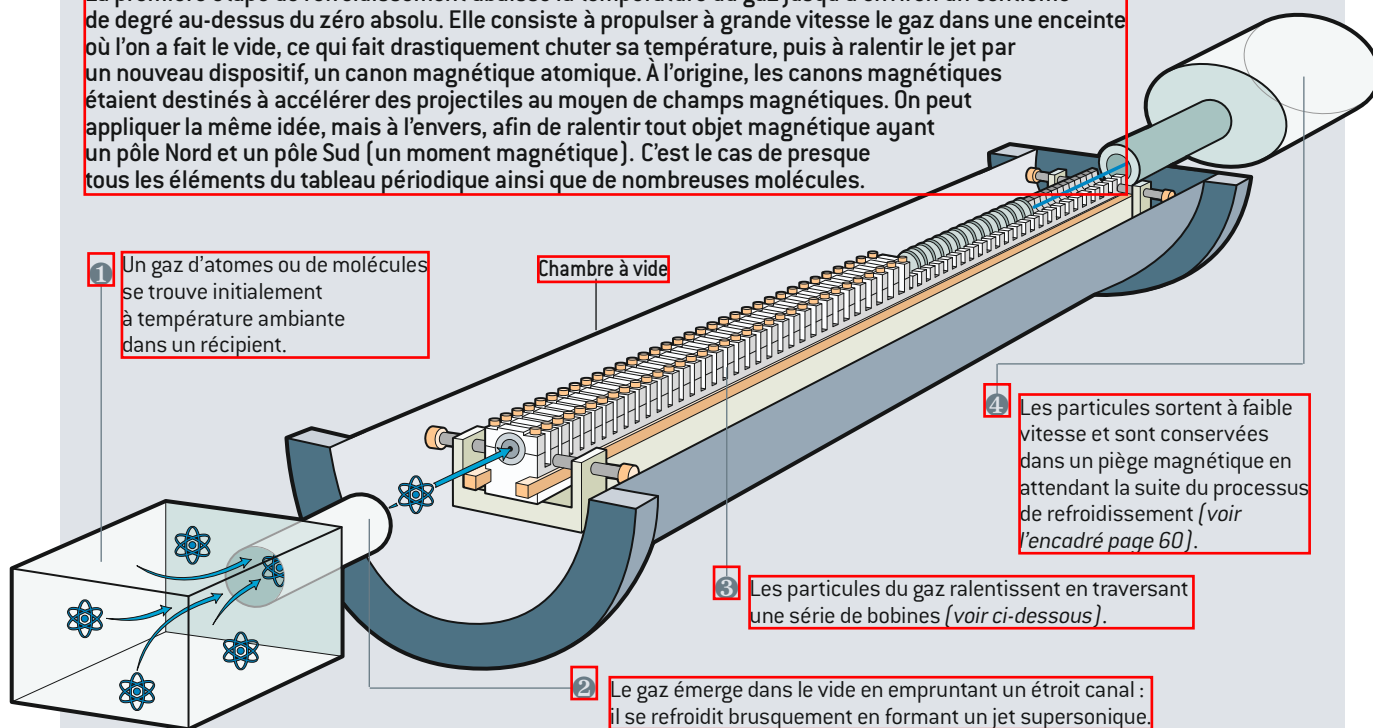
Les réflexions autour du paradoxe de Maxwell et de la solution proposée par Szilárd sont restées pendant de nombreuses années des spéculations purement théoriques. Mes collègues et moi avons été les premiers à réaliser expérimentalement l'expérience de pensée de Maxwell de la façon dont il la concevait, et à montrer en quoi l'intuition de Szilárd, selon laquelle l'information joue un rôle crucial, était correcte. Mentionnons toutefois qu'il y a eu d'autres expériences

récentes fondées sur les mêmes ressorts conceptuels, en utilisant plutôt des nanomachines. Grâce à nos portes à gaz, nous sommes parvenus à refroidir des atomes jusqu'à des températures de 15 millièmes de kelvin.

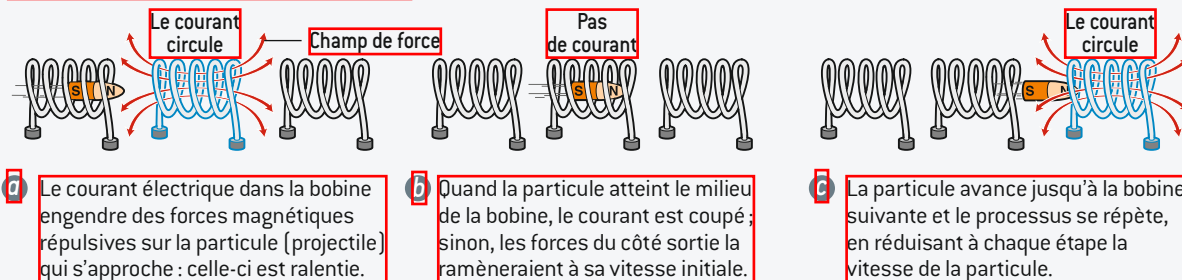
Pour qu'une porte à sens unique fonctionne, j'ai compris que les atomes du gaz devaient avoir deux états différents, deux configurations stables des électrons en orbite. Considérons un gaz d'atomes dans deux états, dénommés bleu et rouge. Les atomes se déplacent dans un récipient traversé en son milieu par un faisceau laser, réglé sur une longueur d'onde bien particulière. Quand ils s'approchent du faisceau, les atomes rouges rebondissent : ils trouvent porte close.

PREMIÈRE ÉTAPE : DES FREINS MAGNÉTIQUES

La première étape de refroidissement abaisse la température du gaz jusqu'à environ un centième de degré au-dessus du zéro absolu. Elle consiste à propulser à grande vitesse le gaz dans une enceinte où l'on a fait le vide, ce qui fait drastiquement chuter sa température, puis à ralentir le jet par un nouveau dispositif, un canon magnétique atomique. À l'origine, les canons magnétiques étaient destinés à accélérer des projectiles au moyen de champs magnétiques. On peut appliquer la même idée, mais à l'envers, afin de ralentir tout objet magnétique ayant un pôle Nord et un pôle Sud (un moment magnétique). C'est le cas de presque tous les éléments du tableau périodique ainsi que de nombreuses molécules.



Comment le canon magnétique fonctionne



Au départ, tous les atomes sont bleus, et peuvent passer sans encombre la porte laser. Une fois la porte franchie, les atomes désormais situés à sa droite rencontrent un second faisceau laser, réglé pour transformer les atomes bleus en atomes rouges par diffusion d'un unique photon. Les atomes, devenus rouges, sont dorénavant repoussés par le premier faisceau laser, et ne peuvent plus traverser la porte dans l'autre sens. À la fin, tous les atomes, rouges, se retrouvent du côté droit, le côté gauche étant vide.

Nous avons ainsi refroidi des atomes de rubidium lors d'une première démonstration de notre porte, début 2008. Nous avons qualifié de « refroidissement à un seul photon » cette méthode, pour la distinguer des premières techniques de refroidissement laser où de nombreux photons interviennent pour refroidir chaque atome.

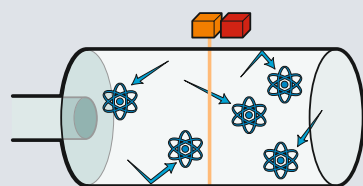
Au même moment, Gonzalo Muga, de l'Université de Bilbao, et son collaborateur Andreas Ruschhaupt (maintenant à l'Université Leibniz de Hanovre, en Allemagne) développaient un concept simi-

laire. Nous avons d'ailleurs travaillé tous les trois ensemble afin d'éclaircir certains aspects théoriques du fonctionnement de la porte.

Nous avons montré en 2006 que lorsqu'un photon est diffusé par un atome (lors de la transition de l'état bleu à l'état rouge), ce photon emporte de l'information relative à l'atome : cette information correspond, selon l'hypothèse de Szilárd, à une minuscule quantité d'entropie. Alors que le photon incident, qui excite l'atome, est issu d'un train ordonné de photons – le faisceau laser –, le photon diffusé se propage dans une direction aléatoire : les photons deviennent donc plus désordonnés.

SECONDE ÉTAPE : UN FROID DÉMONIAQUE

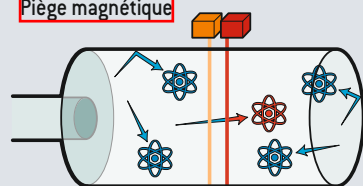
Une fois le gaz refroidi à quelques centièmes de degré au-dessus du zéro absolu par un canon magnétique (ou par un autre dispositif), un processus de refroidissement plus poussé doit prendre le relais, afin de faire descendre la température à quelques millièmes de kelvin, voire moins. Le refroidissement à un seul photon réalise cet exploit grâce à une porte à sens unique, inspirée d'une expérience de pensée du XIX^e siècle, le démon de Maxwell. L'idée est d'abord de concentrer, à l'aide de la porte, les atomes dans un plus petit volume (sans augmenter leur température), puis de leur redonner accès au volume initial (ce qui abaisse la température).



Piège magnétique

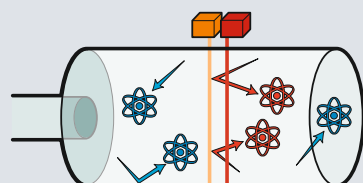
1

Des atomes dans un état initial donné (en bleu) sont retenus dans un piège magnétique. On allume alors un laser (en orange) qui n'agit que sur les atomes situés dans leur second état stable.



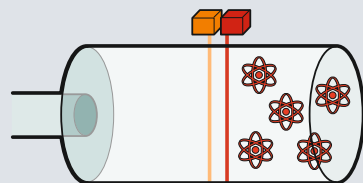
2

Un second faisceau laser (en rouge) fait basculer les atomes qui le croisent, de leur état bleu vers leur second état stable (atome rouge).



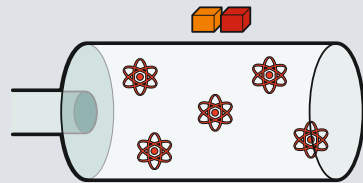
3

Les atomes dans l'état rouge rebondissent dorénavant quand ils rencontrent le laser orange : ils sont contraints de rester du côté droit du piège.



4

Tous les atomes finissent par traverser le second laser : ils deviennent rouges et restent bloqués du côté droit. Ils sont à la même température qu'au départ, mais dans un volume plus petit.



5

On éteint les deux lasers, le gaz d'atomes reprend alors son volume initial. En se dilatant, il se refroidit.

L'entropie est dans les photons

Nous avons montré que l'augmentation d'entropie, liée au désordre croissant des photons, compense exactement la diminution d'entropie des atomes confinés grâce à la porte à sens unique. Ainsi, le refroidissement à un seul photon fonctionne comme un démon de Maxwell, dans le sens précis où l'entendait Szilárd en 1929. Notre démon est simple et efficace : c'est un faisceau laser dont l'opération de tri se fonde sur un phénomène irréversible, la diffusion d'un photon unique. Ce n'est ni un être intelligent ni un ordinateur. Il ne prend pas *stricto sensu* des décisions fondées sur l'information portée par les atomes : il suffit que cette information soit disponible et qu'elle puisse en principe être recueillie.

Le contrôle du mouvement des atomes et des molécules ouvre de nouvelles pistes scientifiques. Les chimistes vont pouvoir piéger et refroidir des molécules afin d'étudier les réactions chimiques dans le régime quantique. N'importe quelle molécule dotée d'un moment magnétique peut être ralentie par le canon magnétique, qui complète utilement une autre méthode similaire, utilisant des forces électriques pour freiner une molécule polarisée électriquement.

Pour des molécules assez petites, le refroidissement à un seul photon pourrait abaisser la température suffisamment pour observer des phénomènes quantiques. Par exemple, les ondes quantiques associées aux molécules s'étireraient assez pour que des molécules éloignées les unes des autres réagissent, et cela sans qu'on ait à fournir l'énergie cinétique

habituellement nécessaire au déclenchement des réactions chimiques.

Un avantage majeur du refroidissement à un seul photon est qu'il s'applique à l'hydrogène et ses isotopes, le deutérium (son noyau est composé d'un proton et d'un neutron) et le tritium (un proton et deux neutrons). Au prix de grands efforts, Dan Kleppner et Thomas Greytak, du MIT, ont réussi à la fin des années 1990 à piéger et refroidir l'hydrogène par des méthodes de cryogénie et de refroidissement par évaporation. Mais ils n'ont jamais pu en faire autant pour le deutérium ou le tritium. Le refroidissement à un seul photon, parce qu'il s'appuie sur un dispositif relativement simple, est adapté au piégeage et au refroidissement des trois isotopes de l'hydrogène.

Le piégeage et le refroidissement du tritium pourraient offrir une réponse à l'une des grandes questions actuelles de la physique des particules : quelle est la masse d'un neutrino ? Le tritium est un isotope radioactif : il se transforme en hélium 3 quand l'un de ses neutrons se désintègre par désintégration bêta pour former un proton, en émettant un électron et un antineutrino (l'homologue pour l'antimatière du neutrino). En mesurant avec précision l'énergie de l'électron émis, les physiciens pourraient déterminer l'énergie disparue, correspondant à l'antineutrino (qui peut traverser l'appareil sans être détecté), et donc sa masse, en principe identique à celle du neutrino.

Séparation d'isotopes, nanostructures...

Les mêmes méthodes pourront s'appliquer aux atomes d'antihydrogène, constitués d'un antiproton et d'un positron (l'antiparticule de l'électron), obtenus récemment au CERN, le laboratoire européen de physique des particules, près de Genève. Un tel antiatome est extrêmement délicat à manipuler, car l'antimatière disparaît très vite, en émettant un éclair d'énergie, dès qu'elle entre en contact avec la matière.

Ici, la méthode du jet supersonique ne peut pas être utilisée comme point de départ. Un faisceau d'antihydrogène pourrait être produit en lançant des antiprotons dans un nuage de positrons, puis arrêté et refroidi avec notre démon de Maxwell. Les expériences sur l'antihydrogène devraient répondre à une question sim-

ple : l'antimatière tombe-t-elle comme la matière ? En d'autres termes, la gravité agit-elle de la même façon sur tous les objets de même masse ?

D'autres applications importantes sont envisageables. Les isotopes de la plupart des éléments peuvent être séparés à l'aide d'un appareil appelé calutron, inventé par Ernest Lawrence dans le cadre du projet Manhattan. Les isotopes, de masses légèrement différentes, y sont séparés au moyen d'un champ électrique, comme

REFROIDIR DES GAZ DE TRITIUM permettrait de répondre à une question fondamentale : quelle est la masse du neutrino ?

dans un spectromètre de masse. Le seul calutron encore actif à l'heure actuelle se situe en Russie, cette méthode étant assez inefficace. On pourrait appliquer le concept du démon de Maxwell, semblable à celui qui fonctionne pour le refroidissement, à la séparation d'isotopes au sein d'un même faisceau : dans ce cas, la porte laser devrait trier les différents isotopes. Cette méthode, plus efficace que les calutrons, pourrait produire des isotopes comme du calcium 48 ou de l'ytterbium 168, utiles en médecine et en recherche fondamentale. Ne produisant que de faibles quantités d'un isotope donné, elle ne présenterait aucun risque de prolifération nucléaire.

Par ailleurs, la méthode des jets supersoniques permettrait de construire des structures nanométriques. Au lieu d'utiliser des champs magnétiques pour ralentir les atomes, on pourrait les utiliser pour focaliser les faisceaux d'atomes, de la même façon qu'une lentille focalise la lumière. Il serait possible d'atteindre une résolution de un nanomètre seulement, voire moins. De tels faisceaux pourraient déposer des atomes et former des structures plus fines qu'il n'est aujourd'hui possible avec la photolithographie, utilisée pour fabriquer les puces électroniques. La construction de structures nanométriques, atome par atome, par une approche ascendante plutôt que descendante (comme c'est généralement le cas en nanosciences), constitue un nouveau domaine que j'ai nommé « atomoscience ».

Le zéro absolu reste une température toujours inaccessible, mais le chemin qui nous en rapproche est pavé de nombreuses découvertes. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Jerkins *et al.*, Efficient isotope separation by single-photon atomic sorting, *Physical Review A*, vol. 82, n° 3, 033414, 2010.

E. Narevicius *et al.*, Stopping supersonic beams with a series of pulsed electromagnetic coils : an atomic coilgun, *Physical Review Letters*, vol. 100, n° 9, 093003, 2008.

A. Ruschhaupt, J. G. Muga et M. G. Raizen, One-photon atomic cooling with an optical Maxwell demon valve, *Journal of Physics B*, vol. 39, pp. 3833-3838, 2006.

M. Raizen *et al.*, Compression of atomic phase space using an asymmetric one-way barrier, *Physical Review Letters*, vol. 94, n° 5, 053003, 2005.

Y. Castin, Les atomes ultrafroids, *Pour la Science*, n° 300, octobre 2002.

L. Szilárd, Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen, *Zeitschrift für Physik. A*, vol. 53, n° 11-12, pp. 840-856, 1929.

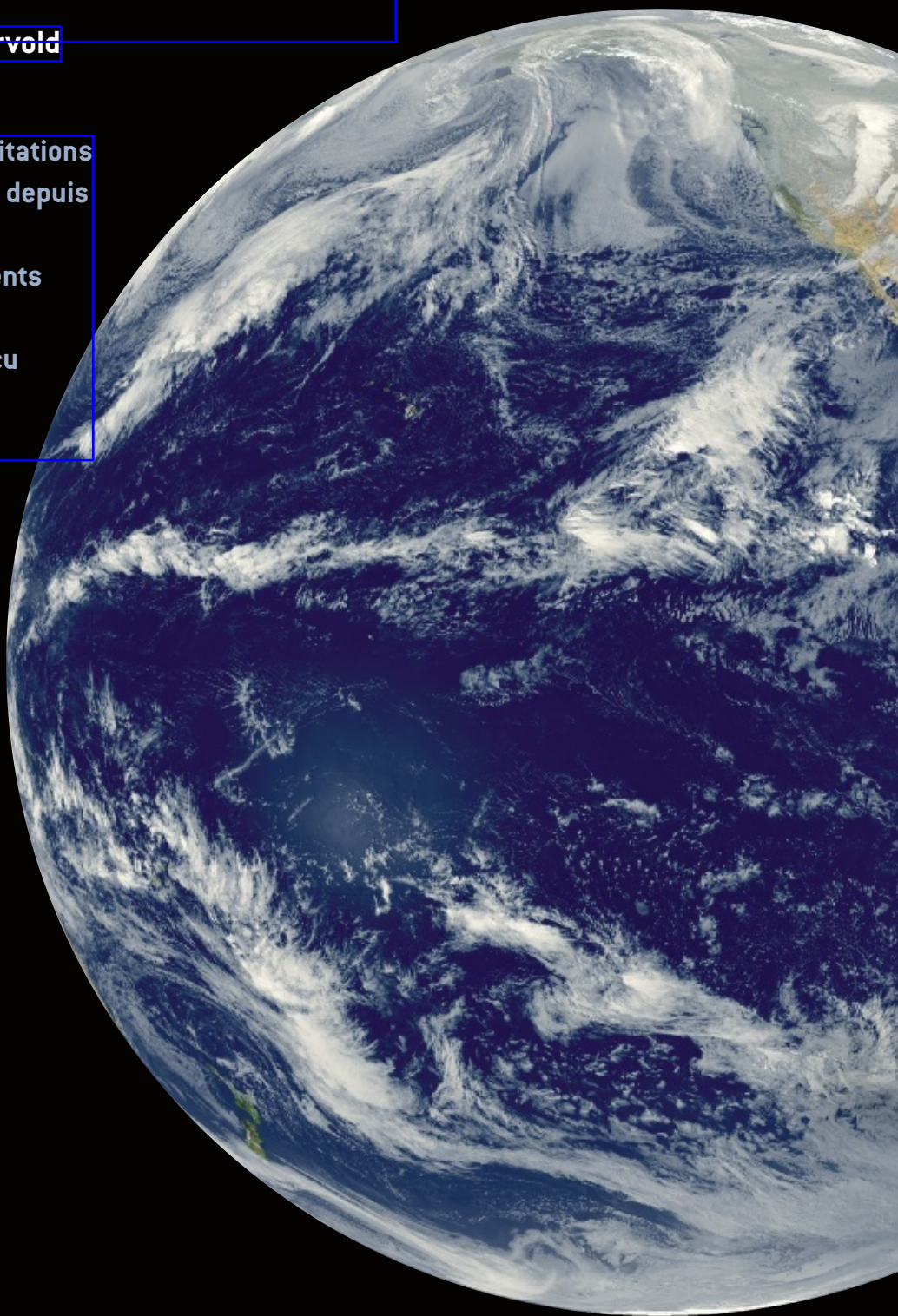
Une bande de précipitations **mouvante**

Julian Sachs et Conor Myhrvold

En cartographiant les précipitations équatoriales sur le Pacifique depuis l'an 800, les scientifiques reconstituent les déplacements de la ceinture pluviale. Ils obtiennent ainsi un aperçu de l'évolution du climat tropical d'ici 2100.

L'ESSENTIEL

- ✓ La bande de précipitations qui ceinture la Terre se décale au gré des changements de la température atmosphérique. Ce déplacement modifie les schémas de précipitations dans le monde entier.
- ✓ Les sédiments prélevés au fond des lacs des îles du Pacifique indiquent que cette bande se situe aujourd'hui à une latitude comprise entre trois et dix degrés de latitude Nord, position jamais atteinte depuis au moins 1 200 ans.
- ✓ Si le réchauffement climatique se poursuit au même rythme, ce décalage vers le Nord pourrait s'accroître de cinq degrés d'ici 2100, asséchant les terres de millions d'agriculteurs en Équateur, en Colombie et ailleurs.





Notre expédition ne se déroulait pas tout à fait comme prévu : le moteur de notre embarcation se mit à hoqueter puis s'arrêta brusquement, en pleine nuit. Le silence n'avait jamais été aussi menaçant. Traverser l'océan à bord d'un petit bateau de pêche en provenance des îles Marshall, au beau milieu du Pacifique Nord, sembla soudain une initiative bien imprudente.

Les deux climatologues que nous sommes revinrent néanmoins sains et saufs de cette traversée, et de bien d'autres encore. Leur objectif commun pouvait paraître à première vue irréalisable : reconstituer l'histoire des précipitations au niveau d'un océan. Car nous souhaitons comprendre comment l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, l'élévation de la température de l'air et la modification des précipitations tropicales sont susceptibles de bouleverser les futurs schémas climatiques. C'est pourquoi nous avons navigué d'une île de l'océan Pacifique à l'autre.

Certains phénomènes climatiques actuels sont bien connus, tels El Niño et La Niña qui touchent tout l'océan Pacifique. Une autre structure climatique, moins bien étudiée mais tout aussi importante, consiste en une bande de fortes précipitations qui ceinture la Terre au niveau des tropiques ; elle migre vers le Nord ou le Sud au gré des saisons, en fonction de la déclinaison du Soleil (l'angle que font ses rayons avec le plan de l'équateur). L'espace où elle évolue porte le nom de zone de convergence intertropicale (ZCIT).

Tout changement de température sur la Terre, dû au rayonnement solaire incident ou à l'accumulation de gaz à effet de serre, peut influencer sur cette ceinture pluvieuse qui alimente les terres agricoles équatoriales. Elle joue un rôle primordial sur le cycle des moussons en Asie, en Afrique et en Inde, ainsi que sur le transport de la chaleur de l'équateur vers les pôles. La fréquence et la puissance d'El Niño et de La Niña, tout comme l'intensité et la durée de la saison des ouragans dans le Pacifique et l'Atlantique, peuvent être influencées par ses déplacements. Les variations pluviométriques qui découleraient d'un décalage définitif de la bande altéreraient profondément le milieu équatorial et auraient des effets à l'échelle planétaire. Or nous avons de bonnes raisons de penser que cette bande est en train de se déplacer.

Il y a peu de temps encore, les climatologues ignoraient si les fluctuations

annuelles de la ligne médiane de cette bande – entre trois et dix degrés de latitude Nord au-dessus de l'océan Pacifique – correspondaient à sa gamme historique. Désormais, grâce aux mesures de terrain effectuées aux mêmes latitudes que la zone de convergence intertropicale, nous avons pu évaluer sa position au cours des 1 200 dernières années. Durant les quatre derniers siècles, elle est remontée de cinq degrés vers le Nord, soit environ 550 kilomètres. Cette découverte nous a permis de prendre conscience qu'une faible augmentation de l'effet de serre peut considérablement modifier les précipitations tropicales.

Retracer l'histoire des précipitations

Dorénavant, il nous est possible d'anticiper le déplacement de la zone de convergence intertropicale, en réaction au réchauffement climatique, d'ici 2100 : les modifications des précipitations sur les zones équatoriales auront de probables répercussions sur les conditions météorologiques et la production agricole dans des régions de latitudes plus élevées (en Asie, en Amérique centrale et dans le Sud des États-Unis). Certains pays pourraient bénéficier de ces changements, mais beaucoup d'autres devront faire face à un climat plus aride.

Avant que nous ne commencions à reconstituer l'historique des précipitations, les chercheurs disposaient de très peu de données sur la localisation de la zone de convergence intertropicale pendant le dernier millénaire. Celle-ci évolue près de l'équateur et peut atteindre des dizaines ou des centaines de kilomètres de largeur, en fonction des conditions locales et de l'ensoleillement saisonnier. Comme elle est très active au-dessus du Pacifique, cette région paraît idéale pour traquer ses mouvements. La bande formant une ceinture autour de la Terre, la tendance au-dessus de l'océan constitue un bon indicateur des changements intervenant au niveau planétaire.

Afin d'estimer le niveau d'insolation passé, les scientifiques mesurent les concentrations en certains isotopes, tels le carbone 14 présent dans les cernes de croissance des arbres, ou le béryllium 10 relevé dans les échantillons de glace des régions polaires. On peut également retracer l'évolution des gaz à effet de serre à partir des bulles d'air piégées dans les carottes de glace extraites au niveau de ces mêmes régions polaires. En comparant l'insolation et le niveau

LES AUTEURS



Julian SACHS, océanographe, est maître de conférences à l'Université de Washington, à Seattle (États-Unis). Conor MYHRVOLD, étudiant en géosciences à l'Université de Princeton, a été l'assistant et le photographe de Julian Sachs lors de ses récentes expéditions.

des gaz à effet de serre avec la position de la zone de convergence intertropicale au cours des siècles, on pourrait en déduire l'impact probable au XXI^e siècle de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre sur les précipitations tropicales.

De nombreux indices permettent d'évaluer la température globale au cours du dernier millénaire. Deux périodes se distinguent : vers l'an 800, les températures étaient globalement similaires à celles de la fin du XIX^e siècle, puis elles ont augmenté de 800 à 1200, atteignant des niveaux équivalents à ceux du XX^e siècle. Elles se sont progressivement stabilisées, puis ont chuté pendant le Petit Âge glaciaire (de 1400 à 1850). Ces deux dernières décennies, l'activité solaire est restée stable, alors que les températures et la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone – le gaz à effet de serre le plus abondamment émis par l'homme – atteignaient tous deux des niveaux jamais égalés en 1 200 ans.

Quand nous avons commencé nos travaux, le climat tropical passé était peu connu. Si les sédiments marins fournissent de précieuses données climatiques couvrant plusieurs milliers d'années, ils s'accumulent trop lentement pour avoir enregistré assez d'informations sur le der-

nier millénaire. De même, de nombreux coraux fabriquent lors de leur croissance des bandes annuelles, à la manière des cernes d'arbres, mais leur vie dépasse rarement 300 ans. On manque donc de données allant de 300 à 1 000 ans dans le passé.

Cartographier les précipitations passées permettrait de combler les lacunes sur la position de la zone de convergence intertropicale au cours du dernier millénaire. Les lacs et les étangs fermés des petites îles parsemant le Pacifique sont à même de raconter cette histoire.

Le passé au fond des lacs

Lors des six dernières années, nous avons collecté des dizaines de carottes de sédiments au fond des lacs d'îles lointaines situées dans l'océan Pacifique, à des latitudes voisines de celle de la ceinture pluviale. Il est possible de définir la position de la zone de convergence intertropicale sur une durée donnée en localisant les zones ayant subi de fortes précipitations au cours de cette période : des variations pluviométriques simultanées aux mêmes latitudes, vers le Nord ou le Sud, signalent un déplacement général de la bande de précipitations au niveau de l'océan.

Prélever des échantillons sur le terrain est une aventure pleine de péripéties, de problèmes de matériel, où la barrière de la langue s'ajoute à la difficulté d'accéder à certains endroits. Par exemple, lorsque nous sommes arrivés à Majuro, capitale de l'archipel des îles Marshall, la compagnie aérienne locale, *Air Marshall Islands* – que les habitants appellent tendrement *Air Maybe* (« Air Peut-être ») – avait deux avions en panne sur une flotte composée de... deux appareils.

Pour prélever une carotte de sédiments, on enfonce, on pousse et on visse un long tube creux dans les dépôts accumulés au fond d'un lac. À peu près tous les sites sur lesquels nous avons effectué des carottages ont une séquence sédimentaire particulière. On peut tomber sur des couches rouge vif de plusieurs mètres d'épaisseur : de consistance gélatineuse, elles sont constituées de cyanobactéries, comme dans le lac de l'île Washington (îles de la Ligne). On trouve aussi des boues brunâtres, riches en sulfure d'hydrogène (qui sent mauvais!), contenant des fragments de feuilles de palétuvier, ou encore des couches de coquilles de mollusques bivalves, comme dans les îles Palaos.

Les algues, des pluviomètres biologiques

Les algues tirent tout leur hydrogène de l'eau dans laquelle elles vivent. La mesure de la concentration des deux isotopes stables de l'hydrogène – protium (H) et deutérium (D) – dans les lipides des algues présentes dans les sédiments lacustres renseigne sur leur environnement passé, et notamment sur la quantité de pluie tombée au cours de leur vie.

Chez de nombreuses algues, le rapport isotopique D/H est proportionnel au rapport D/H de l'eau, qui reflète l'importance des précipitations par rapport à l'évaporation du lac. Dans la zone d'influence de la bande de précipitations, où les pluies sont fréquentes et abondantes, le rapport D/H de l'eau des lacs ou de la mer est faible. Hors de cette zone, l'évaporation peut être supérieure aux précipitations, ce qui correspond à un rap-

port D/H élevé (H_2O , plus léger que D_2O , s'évapore plus facilement). Ainsi, en mesurant les rapports D/H des lipides des algues extraites des sédiments, on évalue les précipitations au cours des siècles passés.

Les algues ajustent également le rapport D/H dans leurs lipides en fonction de la salinité du milieu. Les conditions particulières de l'île Christmas ont fait office d'expérience naturelle. Cette île abrite un certain nombre de retenues d'eau dont la température, le niveau d'ensoleillement, les substances nutritives et le rapport D/H sont identiques ; seuls leurs niveaux de salinité diffèrent. La relation entre salinité et rapport isotopique a ainsi pu être étalonnée. Nous avons découvert que le rapport D/H des lipides produits par les cyanobactéries croît linéairement avec la salinité.

Étant donné que la salinité des retenues d'eau saumâtre diminue quand les précipitations sont abondantes et augmente quand il fait sec, l'effet de la salinité sur le rapport D/H des lipides agit dans le même sens que le volume des précipitations évoqué plus haut. Le rapport D/H des lipides des algues constitue donc un indicateur sensible des changements hydrologiques.

À eux seuls, ces résultats ne valent pas grand-chose s'ils ne sont pas accompagnés de dates. L'âge d'un sédiment est déterminé par deux isotopes radioactifs, le carbone 14 et le plomb 210, dont la demi-vie est, respectivement, de 5 730 et 22,3 ans. En comparant les rapports isotopiques de l'hydrogène à différentes dates, les auteurs ont pu reconstituer les variations pluviométriques sur les 1 200 dernières années.

Les pieds dans la vase, ou depuis un canot sur des eaux peu profondes, nous avons testé la profondeur des sédiments et la présence d'obstacles en enfonçant une longue tige. Si l'on butte sur de la roche, du corail, du sable ou des racines, le carottage ne peut avoir lieu.

L'épaisseur des dépôts étant très variable, on ignore jusqu'à quelle profondeur on doit sonder. En général, un mètre de sédiments équivaut à plusieurs centaines d'années. À titre d'exemple, un carottage de neuf mètres sur l'île Washington a permis de collecter 3200 ans d'archives sédimentaires. Si possible, on essaie d'atteindre le soubassement rocheux. Les dépôts de sable, de corail ou de roche volcanique indiquent l'époque où le lac a commencé à accumuler des sédiments : on obtient alors un historique du climat le plus complet possible.

Afin de reconstituer l'histoire des précipitations, nous avons aussi mesuré les caractéristiques de l'écosystème actuel : on peut ainsi savoir ce que le même type de mesures dans un environnement antérieur révèle du climat de l'époque. On prélève donc des échantillons d'eau à différentes profondeurs pour en déterminer la composition chimique, le rapport isotopique de l'hydrogène, et pour caractériser les populations d'algues et de micro-organismes. À l'aide de filtres fins en fibres de verre, du phytoplancton, du zooplancton et des microbes sont capturés et conservés immédiatement dans de la glace pour analyser ultérieurement leur composition lipidique. Des échantillons de végétation sont également collectés à proximité pour mesurer leur teneur en lipides.

Une fois les échantillons prélevés au fond du lac, il fallait les acheminer au laboratoire sans les abîmer. Pour que les différentes couches de sédiments ne se mélangent pas, nous avons découpé sur place, avec précaution, la partie supérieure de la carotte de sédiments, particulièrement meuble, en sections d'un centimètre d'épaisseur emballées dans des sacs en plastique étiquetés. Puis nous avons entamé le voyage du retour vers notre laboratoire à Seattle, accompagnés de glacières remplies de sédiments et d'échantillons d'eau, et de grands cartons contenant les segments de carottes ne nécessitant pas d'emballage particulier.

En mesurant les deux isotopes stables de l'hydrogène dans les lipides des algues conservées au sein des couches sédimentaires successives, et en datant les échantillons, nous avons pu estimer la



1. UNE CAROTTE DE SÉDIMENTS extraite du fond d'un lac sur l'île Lib. Elle contient des algues, riches d'enseignements sur l'histoire des précipitations.



2. LES ARBRES SE SONT RÉVÉLÉS PRATIQUES pour maintenir verticales les carottes de sédiments. Les scientifiques coupaient de minces tranches dans le haut de la carotte, là où les sédiments sont très meubles, pour les emballer et les envoyer au laboratoire.

quantité de pluie tombée à l'époque où vivait cette flore (voir l'encadré page 64).

D'année en année, la carte a été complétée, d'où une localisation de plus en plus précise de la zone de convergence intertropicale à travers le temps. D'autres données, qui nécessiteront encore quelques mois de travail, viendront enrichir ces résultats, dont celles obtenues lors de notre dernière expédition dans la région de Kosrae en Micronésie.

Les données déjà acquises, ajoutées aux résultats d'autres équipes, indiquent que de petites variations de la température atmosphérique se sont accompagnées de profonds bouleversements pluviométriques pendant le Petit Âge glaciaire. Des régions auparavant humides, telles que les îles Palaos, se sont asséchées, alors que la pluie était devenue abondante sur les îles Galápagos et sur d'autres contrées auparavant arides. Ainsi, quand l'énergie solaire incidente sur le haut de l'atmosphère a diminué de seulement 0,2 pour cent pendant une centaine d'années, la zone de convergence intertropicale s'est déplacée de 500 kilomètres vers le Sud, en direction de l'équateur.

Une sensibilité plutôt inquiétante

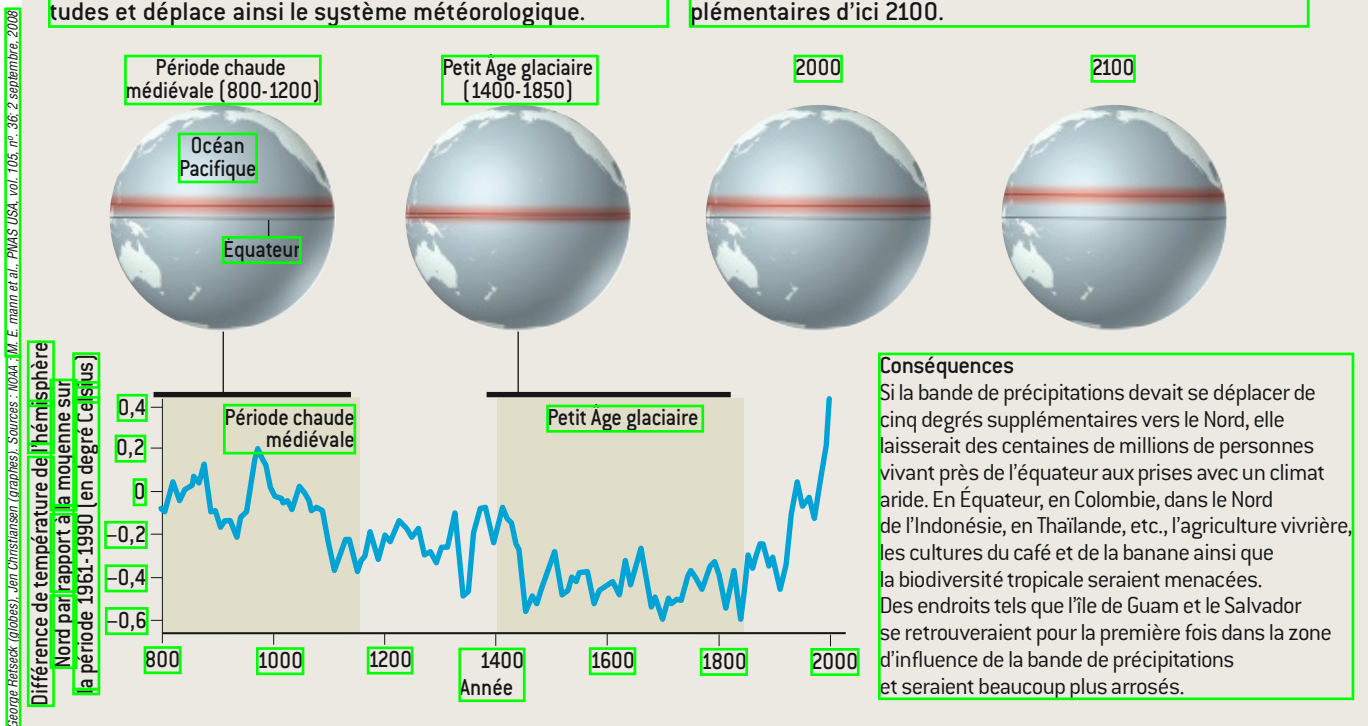
Cette sensibilité ne présage rien de bon. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prévoit qu'en 2050, essentiellement en raison des émissions automobiles et industrielles, la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère sera deux fois plus élevée qu'à l'ère préindustrielle ; et qu'elle aura triplé d'ici 2100, provoquant un accroissement de la température atmosphérique deux à trois fois supérieur à celui survenu à la fin du Petit Âge glaciaire, uniquement dû à une plus grande activité solaire.

Lors du Petit Âge glaciaire, la ligne médiane de la bande nuageuse tropicale restait au Sud de la limite de cinq degrés de latitude Nord. Elle a aujourd'hui migré vers le Nord et oscille entre trois et dix degrés de latitude Nord. Les récentes augmentations de la concentration des gaz à effet de serre risquent de faire remonter la bande de cinq degrés supplémentaires, soit 550 kilomètres, d'ici 2100. Cette nouvelle position, entre 8 et 15 degrés de latitude Nord, modifierait notablement l'intensité des précipitations dans de nombreuses régions (voir l'encadré page 66).

QUAND LA TEMPÉRATURE MONTE, LA BANDE DE PRÉCIPITATIONS FAIT DE MÊME

La zone de convergence intertropicale (*en rouge*), qui encercle la Terre, résulte de la rencontre de masses d'air opposées, portées par les alizés, qui créent une zone de basse pression au-dessus des eaux équatoriales chauffées par le Soleil. L'eau s'évapore, s'élève et se transforme en pluie, pour la majeure partie. La basse pression produit aussi d'énormes cellules de hautes pressions adjacentes qui font circuler la chaleur atmosphérique vers de plus hautes latitudes et déplace ainsi le système météorologique.

Pendant la période chaude médiévale (*à gauche*), les températures élevées de l'hémisphère Nord ont fait bouger la bande de précipitations vers le Nord. Au cours du Petit Âge glaciaire, des températures plus fraîches l'ont fait redescendre vers le Sud. Aujourd'hui, elle s'est déplacée vers le Nord comme jamais elle ne l'a fait depuis 1 200 ans. La hausse prévisible de la concentration des gaz à effet de serre pourrait lui faire franchir cinq degrés de latitude supplémentaires d'ici 2100.



BIBLIOGRAPHIE

A. de Sherbinin et al., Les victimes du changement climatique, *Pour la Science*, n° 403, mai 2011.

J. Field et al., Paleoclimates and the emergence of fortifications in the tropical Pacific islands, *Journal of Anthropological Archaeology*, vol. 29, n° 1, 2010.

J. Sachs et al., Southward movement of the Pacific intertropical convergence zone AD 1400-1850, *Nature Geoscience*, vol. 2, n° 7, pp. 519-525, 2009.

M. Mann et al., Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia, *PNAS*, vol. 105, n° 36, pp. 13252-13257, 2008.

G. Haug et al., Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene, *Science*, vol. 293, n° 5533, pp. 1304-1307, 2001.

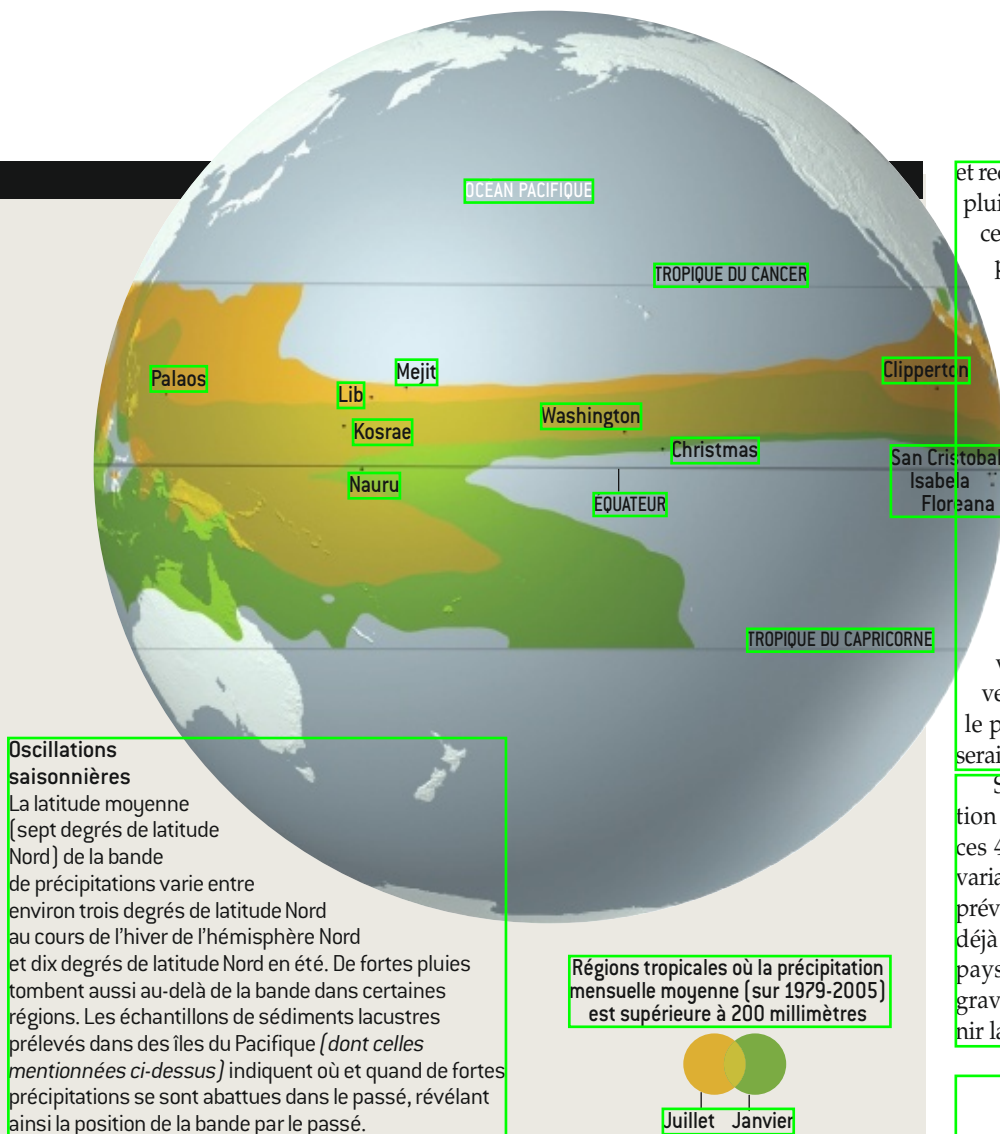
Ces changements potentiels sont étayés par nos découvertes dans les îles du Pacifique. L'île Washington, à cinq degrés de latitude Nord, reçoit ainsi aujourd'hui trois mètres de précipitations annuelles, contre moins d'un mètre il y a 400 ans, alors que l'évaporation était plus importante. À l'opposé, la région montagneuse de l'île San Cristobal, à un degré de latitude Sud, dans l'archipel désertique des Galápagos, était beaucoup plus arrosée durant le Petit Âge glaciaire.

Les archéologues collectent aussi d'utiles informations. Ils ont découvert que, sur des îles d'Indonésie ou du Pacifique Sud, l'accélération des constructions de fortifications coïncidait avec le dernier grand déplacement de la zone de convergence intertropicale, lors du Petit Âge glaciaire. Alors que cette zone glissait vers le Sud, les îles du Nord devenaient arides, obligeant sans doute leurs habitants à fuir vers des îles plus méridionales : les populations autochtones ont alors construit des fortifications pour se protéger de ces intrusions.

Aujourd'hui, les techniques de dessalement de l'eau de mer et les transports diminuent la dépendance vis-à-vis des pluies. Mais une remontée de la bande pluviale de cinq degrés menacerait des centaines de millions de personnes qui vivent à proximité de l'équateur et dépendent de l'agriculture vivrière, sans parler des risques pour la biodiversité tropicale. La plupart des pays de cette zone sont en développement et pourraient connaître une forte croissance démographique au cours de ce siècle. Ils risquent de ne pas avoir les ressources nécessaires pour y faire face.

Changements de régimes

Les déficits pluviométriques d'un côté, les inondations de l'autre, réduiraient en quelques décennies, voire moins, les rendements agricoles et conduiraient à des pénuries alimentaires localisées, à l'instabilité politique et à des déplacements de populations. Des régions situées pour la première fois dans



la zone de convergence intertropicale (entre 10 et 15 degrés de latitude Nord), comme le Salvador et les environs de Manille, au Nord des Philippines, connaîtraient une augmentation des précipitations annuelles. À l'inverse, des régions désormais hors de la zone d'influence de la bande de précipitations (entre trois et huit degrés de latitude Nord) deviendraient plus arides. La puissance des moussons asiatiques et indiennes compenserait-elle par endroits cet effet de sécheresse ? Les scientifiques en débattent.

Les régions humides que sont le Nord de l'Indonésie, la Malaisie, les Philippines, la Micronésie, la Thaïlande et le Cambodge seraient privées d'une grande partie des pluies qu'elles reçoivent de nos jours sous l'influence de la zone de convergence intertropicale. Les variétés agricoles adaptées aux actuelles conditions météorologiques ne seraient plus acclimatées. Par exemple, les plantations de café exigent beaucoup d'eau en début de croissance, et un total de plus de 1,8 mètre pour parvenir à maturité.

En Amérique centrale, l'Équateur et la Colombie seraient, laissés en marge de la zone de convergence intertropicale, victimes de la sécheresse. On pourrait penser que l'urbanisation continue de la Colombie l'aidera à faire face à la situation, son économie ne dépendant plus autant de l'agriculture. Or ce pays est le troisième plus gros producteur de café et, comme en Indonésie, de moindres précipitations affecteraient à terme les rendements. La plupart des régions productrices de café situées à des latitudes inférieures à huit degrés de latitude Nord pourraient bien être concernées dans la seconde moitié du XXI^e siècle. Les zones de production situées au Sud ou le long des côtes sont les plus menacées, car plus éloignées de la bande de précipitations.

L'horizon est également assez sombre pour l'industrie de la banane en Équateur. Des températures élevées conjuguées à des précipitations annuelles de 2 à 2,5 mètres sont nécessaires pour obtenir un fruit savoureux. Or l'Équateur se situe déjà bien au Sud de la zone de convergence intertropicale

et reçoit tout juste la quantité minimale de pluie nécessaire à cette culture. Un déplacement de la bande pluviale réduirait les précipitations à un mètre par an, ou moins, d'ici 2100 et mettrait un terme à l'industrie de la banane dans ce pays. Une chute drastique des rendements pourrait d'ailleurs survenir plus rapidement que prévu. Début 2010, environ la moitié des plantations des Philippines ont donné des bananes de trop petit calibre, non commercialisables, à cause d'une saison anormalement sèche.

L'agriculture vivrière serait touchée dans toutes les régions que nous venons de mentionner. L'exode rural vers les centres urbains ne résoudra pas le problème et une pénurie alimentaire serait catastrophique.

Si la bande pluvieuse poursuit sa migration vers le Nord au même rythme que ces 400 dernières années, d'importantes variations pluviométriques sont également prévisibles aux États-Unis, si elles n'ont pas déjà commencé. Ainsi, le Sud-Ouest du pays subit depuis plusieurs années une grave sécheresse qui pourrait bien devenir la nouvelle norme au XXI^e siècle.

Des modèles plus appropriés

Un tel mouvement risque-t-il d'affecter la fréquence des ouragans et des moussons ou d'en modifier l'intensité ? Les scientifiques n'ont pas encore tranché. De même, d'éventuelles conséquences sur El Niño et La Niña restent à évaluer.

Il reste beaucoup à faire avant de tirer avec certitude le signal d'alarme. Les modèles numériques du climat n'ont pas encore reproduit avec précision les schémas pluviométriques actuels ou passés pour la région tropicale. Si les simulateurs réussissent à utiliser les données fournies par les carottes de sédiments et d'autres sources pour produire des schémas plus proches de ceux que l'on connaît déjà, le monde pourra se fier davantage à leurs prévisions pour les précipitations futures.

Quant à nous, nous allons poursuivre notre étude des sédiments en provenance d'îles situées dans la zone de convergence intertropicale, ainsi qu'au Nord et au Sud de celle-ci, afin de définir avec plus de précision sa position au cours du dernier millénaire, et de prévoir où elle se situera dans les décennies à venir.

Premiers accouplements

John Long

Depuis quand les animaux supérieurs s'accouplent-ils pour procréer ? La découverte de fossiles de poissons archaïques, vieux de 375 millions d'années, offre une réponse à la question et éclaire notre propre évolution.

Août 2005. Il fait chaud. Mon équipe et moi sommes partis à la pêche aux fossiles de poissons sur la formation de Gogo. Situé au Nord-Ouest de l'Australie, cet ancien récif corallien est aujourd'hui une vaste terre aride, sans vie aquatique ou presque, où l'on élève du bétail. Il y a quelque 375 millions d'années, à la fin du Dévonien (416 à 359 millions d'années), il en allait tout autrement. Une mer peu profonde recouvrait alors la région ; la vie marine grouillait dans l'immense récif tropical de Gogo.

Par chance, nombre des poissons de Gogo nous sont parvenus en bon état au sein de nodules de calcaire libérés par l'érosion des schistes argileux de la région. De la taille d'un ballon de handball, ces nodules sont éparpillés sous les buissons, où se réfugient pendant la journée de nombreuses vipères de la mort, une espèce australienne parmi les plus venimeuses au monde. Pour faire bonne pêche sans risquer sa vie, il faut donc faire très attention en saisissant ces pierres, avant de les ouvrir d'un coup de marteau à la recherche d'un fossile...

Les plus fréquents des poissons primitifs de Gogo étaient les placodermes. Comme

l'indique leur nom, les poissons de ce groupe disparu avant le Carbonifère (359 à 299 millions d'années) avaient des plaques sur la peau, formant une cuirasse. Ils ont été parmi les premiers animaux vertébrés dotés de mâchoires. Ils ont prospéré durant près de 70 millions d'années : ils sont l'un des plus grands succès évolutifs de leur époque.

En ce jour d'août 2005, nous étions à Gogo pour étudier la question des liens entre les placodermes et les autres vertébrés, dont les paléontologues débattent depuis longtemps. Or un poisson presque complet découvert ce jour-là s'est révélé être une trouvaille sensationnelle. Le fossile ne m'a guère semblé remarquable sur le moment : j'ai simplement pensé avoir un poisson de plus dans le filet que je ramènerai au laboratoire. Toutefois, une fois extrait de sa gangue de calcaire, il s'est révélé vivipare, ce qui bouleversait notre vision de l'origine de l'accouplement et de la fécondation interne chez les vertébrés.

La viviparité – le fait que l'embryon se développe à l'intérieur du corps de la mère – était censée être apparue pour la première fois chez les chondrich-



L'ESSENTIEL

✓ La copulation des vertébrés était supposée être apparue il y a 350 millions d'années chez les requins et autres poissons cartilagineux.

✓ Plusieurs fossiles de femelles porteuses d'embryons attestent que la fécondation interne est apparue 25 millions d'années plus tôt au sein d'une classe de poissons plus primitifs.

✓ Ces découvertes éclairent d'un jour nouveau l'origine de nos propres organes sexuels, ainsi que celle de nos membres.

Owen Gifford Steene

tyens (requins, raies et autres poissons cartilagineux), il y a quelque 350 millions d'années, soit quelque 70 millions d'années après l'apparition des premiers membres de ce groupe. On pensait qu'auparavant, les femelles poissons ne faisaient que frayer, c'est-à-dire déposer leurs œufs dans l'eau, où les mâles venaient les féconder avant que les embryons ne se développent en pleine eau. Or notre découverte de Gogo montrait que la copulation et la mise au monde de jeunes entièrement formés étaient apparues des millions d'années plus tôt, chez des vertébrés plus primitifs que les poissons cartilagineux.

Quand il se révèle qu'un trait biologique aussi majeur que le mode de procréation s'est transformé bien plus tôt qu'on ne le pensait, tout paléontologue ne peut qu'être fasciné. Toutefois, l'importance de notre trouvaille tient aussi au fait que les placodermes appartiennent à la même longue lignée que celle des tétrapodes, les animaux à quatre membres dont les humains font partie.

L'appareil génital de ces anciens placodermes nous renseigne sur la façon dont

sont apparus nos organes sexuels et d'autres parties de notre corps. Ce sont en effet les nageoires pelviennes (la paire de nageoires situées à l'arrière du corps), dont se servaient les placodermes mâles pour introduire leur sperme dans les femelles, qui ont donné naissance aux organes génitaux et aux pattes postérieures des tétrapodes.

Des fossiles en 3D, non aplatis

Quant aux mâchoires, il se peut qu'elles soient apparues pour permettre aux mâles de maintenir les femelles durant l'accouplement. Ce ne serait que bien après leur apparition pour cet usage qu'elles auraient été employées aussi pour mastiquer la nourriture. Le sexe, semble-t-il, a vraiment tout changé...

Si les fossiles de Gogo sont si célèbres, c'est parce que, contrairement à la plupart des fossiles de poissons, ils sont le plus souvent très bien conservés dans les trois dimensions, et non aplatis. La mise au jour complète des squelettes prend cependant beaucoup de temps : afin d'évi-

ter d'endommager les os fossilisés, nous devons dissoudre lentement la matrice calcaire avec de l'acide acétique dilué. Cela explique que je n'aie pas trouvé le temps de dégager le poisson ramené de Gogo avant novembre 2007.

En nous fondant sur ses mâchoires et ses dents robustes, faites pour broyer, ma collègue Kate Trinajstić, aujourd'hui à l'Université Curtin en Australie, et moi-même avons déterminé que cet animal de la taille d'un maquereau appartient à la famille des Ptyctodontidés au sein des placodermes. Cette découverte était encourageante, car les Ptyctodontidés sont mal connus et notre spécimen semblait représenter une nouvelle espèce. Mais elle allait se révéler encore plus intéressante.

Pendant que je retirais le calcaire, mon attention fut attirée par des structures inhabituelles à la base de la queue. En les examinant de près au microscope, je vis de petites mâchoires à côté de quelques autres minuscules ossements. Je compris alors ce dont il s'agissait et vécus l'un de ces sublimes moments de découverte que les chercheurs – s'ils ont de la chance – ne connaissent qu'une fois dans leur vie.



CE CORDON OMBILICAL FOSSILISÉ reliait il y a environ 375 millions d'années une femelle de l'ancien poisson placoderme *Materpiscis* à l'embryon qui se développait dans son ventre. *Materpiscis* constitue le plus ancien exemple connu de vertébré qui s'accouplait et mettait au monde des petits entièrement formés.

L'AUTEUR



John LONG, paléontologue australien, est depuis 2009 vice-président de la recherche scientifique et des collections au Muséum d'histoire naturelle du comté de Los Angeles, aux États-Unis.

BIBLIOGRAPHIE

P. Ahlberg *et al.*, Pelvic claspers confirm Chondrichthyan-like internal fertilization in Arthrodires, *Nature*, vol. 460, pp. 888-889, 2009.

J. A. Long *et al.*, Devonian Arthrodire embryos and the origin of internal fertilization in vertebrates, *Nature*, vol. 457, pp. 1124-1127, 2009.

M. Brazeau, The braincase and jaws of a Devonian « acanthodian » and the origin of modern gnathostomes, *Nature*, vol. 457, pp. 305-308, 2009.

J. A. Long *et al.*, Live birth in the Devonian period, *Nature*, vol. 453, pp. 650-652, 2008.

J. A. Long, *Swimming in Stone*, Fremantle Press, 2006.

M. J. Cohn, Developmental genetics of the external genitalia, *Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol. 545, pp. 149-157, 2004.

J'aurais pu supposer qu'il ne s'agissait là que des restes du dernier repas du poisson ; mais les mâchoires minuscules présentaient les mêmes caractéristiques distinctives que celles de l'animal plus grand, et étaient intactes et encore partiellement articulées. Tout indiquait que les os miniatures étaient ceux d'un embryon en cours de développement, et non ceux d'une petite proie.

En outre, une structure torsadée entourait le minuscule squelette. L'examen au microscope électronique à balayage nous permit d'affirmer qu'il s'agissait du reste minéralisé du cordon ombilical reliant l'embryon au sac vitellin (une réserve nutritive toujours présente au début de la vie des organismes). L'affaire était entendue : nous avions découvert une mère poisson vieille de 375 millions d'années et le plus ancien embryon de vertébré à ce jour.

Nous avons décidé de nommer l'espèce découverte *Materpiscis attenboroughi*, ce qui signifie « poisson mère d'Attenborough », en l'honneur du naturaliste et réalisateur britannique David Attenborough, qui fit connaître les fossiles de Gogo au monde entier grâce à la célèbre série documentaire *Life on Earth* (1979).

Materpiscis nous a permis de résoudre une vieille énigme posée par les Ptyctodontidés. À la fin des années 1930, l'anatomiste britannique David Watson avait observé que les mâles d'une espèce de Ptyctodontidés provenant d'Écosse avaient de longues extensions cartilagineuses sortant de la ceinture osseuse qui soutient les nageoires pelviennes. Ces extensions, qui devaient être recouvertes

de chair et de peau, forment des structures nommées ptérygopodes. Elles sont apparentées aux deux organes de la copulation présents chez tous les poissons cartilagineux (chondrichthyens) actuels. Durant la copulation, ceux-ci insèrent l'un ou l'autre de ces organes dans le corps de la femelle afin d'y introduire le sperme.

Cependant, les ptérygopodes des Ptyctodontidés écossais étaient recouverts de plaques osseuses, ce qui devait les rendre rigides et peu pratiques. En outre, si tous les ptérygopodes des chondrichthyens sont munis de crochets qui permettent de les maintenir en place durant l'accouplement, les crochets de ce ptyctodontidé étaient si développés qu'ils semblaient être plus un obstacle à l'accouplement qu'une aide.

La preuve d'une fécondation interne

Les mêmes caractéristiques curieuses sont apparues chez les Ptyctodontidés découverts ultérieurement. Les chercheurs se sont donc demandé si ces ptérygopodes s'inséraient vraiment dans le corps des femelles, s'ils servaient à les maintenir pendant l'accouplement, ou s'il ne s'agissait que d'ornements hérissés dont l'utilité se bornait à attirer un partenaire. Quant à décider si les Ptyctodontidés s'accouplaient ou frayaient, c'était impossible. D'où l'intérêt majeur de notre mère poisson : elle prouve que certains Ptyctodontidés au moins se reproduisaient par fécondation interne et mise au monde de petits entièrement formés.

Cette révélation nous a poussés à réexaminer d'autres fossiles de Ptyctodontidés découverts à Gogo. C'est ainsi que nous fûmes conduits à un spécimen d'*Austroptyctodus*, un autre genre de Ptyctodontidés, que j'avais préparé 20 ans plus tôt. En l'examinant au microscope avec un grossissement plus fort, je pus observer que des structures initialement interprétées comme des écailles détachées étaient en réalité des os d'embryons. Nous avons ainsi découvert une autre mère poisson, morte dans la fleur de l'âge et porteuse de triplés.

Après ces découvertes de Ptyctodontidés à embryons, nous avons entrepris d'étudier d'autres placodermes de Gogo. Nos travaux avaient mis en évidence la copulation et la viviparité chez les Ptyctodontidés, mais ces derniers ne sont que l'un des sept groupes connus de placodermes. Dans quelle mesure ce nouveau mode de

reproduction était-il répandu ? Nous avons étudié des spécimens du genre *Incisoscutum*, auparavant remarquables pour leur « contenu stomacal » : des os de plus petits poissons. Ces poissons ainsi qu'un autre appartenant au même genre se sont aussi révélés porteurs d'embryons.

Incisoscutum appartient au plus vaste groupe de placodermes, les arthrodires. Ce groupe est constitué de plus de 300 espèces, comprenant les plus gros placodermes ayant jamais vécu, tel l'effrayant *Dunkleosteus*, qui mesurait six mètres de long. Avant notre découverte, il n'existait aucun indice d'un dimorphisme sexuel chez les arthrodires ni d'indication sur leur mode de reproduction. Les embryons que nous avons découverts montrent sans ambiguïté qu'*Incisoscutum* se reproduisait par fécondation interne. À partir de spécimens provenant de Gogo et d'autres sites, nous avons aussi montré que les mâles d'arthrodires possédaient des ptérygopodes. Ainsi,

au moins deux des sept groupes principaux de placodermes, dont le plus important, se reproduisaient par copulation au moins 25 millions d'années avant les requins et autres chondrichthyens.

Il apparaît donc clairement que les placodermes ont été, chez les vertébrés, les précurseurs de la reproduction par accouplement. Selon la théorie qui prévalait avant nos découvertes, ces organismes auraient donné naissance à l'un seulement des deux groupes vivants de vertébrés à mâchoires, à savoir les chondrichthyens (requins, raies et chimères actuels). Mais les nouvelles découvertes et la méticuleuse analyse des relations de parenté chez les premiers vertébrés réalisée en 2009 par Martin Brazeau, aujourd'hui au Muséum d'histoire naturelle de Berlin, suggèrent que les placodermes sont les ancêtres à la fois des premiers poissons cartilagineux et des acanthodiens, un groupe éteint de poissons à mâchoires. On pense aujourd'hui que certains

acanthodiens sont les ancêtres des poissons osseux, la lignée ayant conduit aux tétrapodes – les animaux à quatre membres – dont descendent tous les vertébrés terrestres, y compris l'homme.

Des nageoires devenues pénis

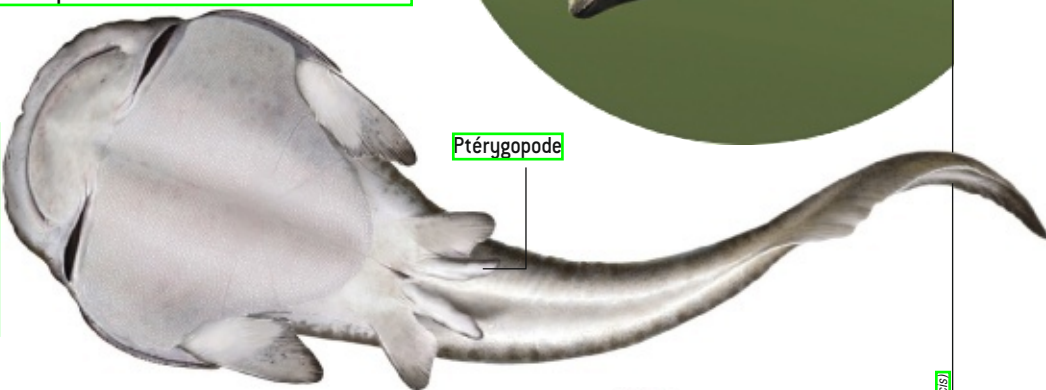
Ce scénario révisé de l'apparition de l'accouplement chez les vertébrés a toutefois soulevé de nouvelles questions. Mes collègues et moi avons commencé à réfléchir aux conséquences, sur l'évolution des vertébrés, de l'apparition de la copulation comme stratégie de reproduction. Des comparaisons anatomiques faites par d'autres chercheurs et par nous-mêmes nous faisaient déjà penser que les membres postérieurs et les organes génitaux des tétrapodes avaient évolué à partir de la ceinture pelvienne (comprenant les ptérygopodes) des premiers poissons.

L'ORIGINE DE L'ACCOUPLEMENT CHEZ LES VERTÉBRÉS

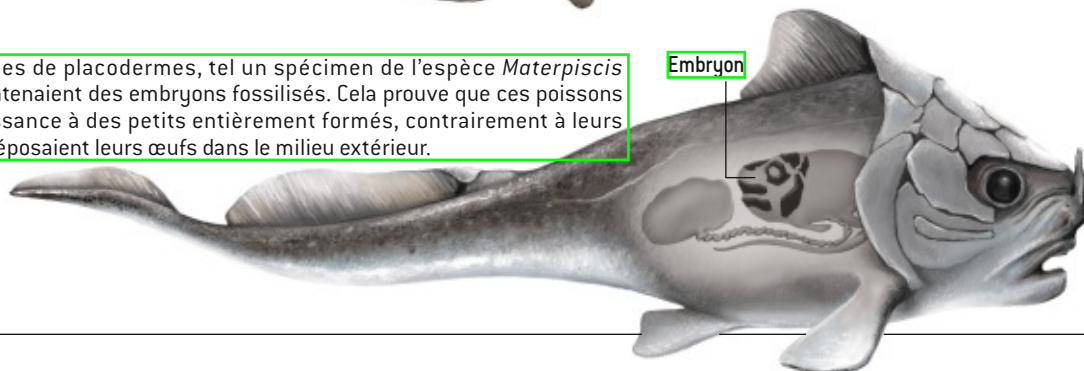
Les poissons de la classe éteinte des placodermes furent parmi les premiers vertébrés à posséder une mâchoire. L'auteur et ses collègues ont découvert qu'il y a environ 375 millions d'années, ils furent aussi parmi les premiers vertébrés à pratiquer la fécondation interne et à donner naissance à des petits entièrement formés, au lieu de frayer comme la plupart des poissons. Même si les poissons qui s'accouplent ont une progéniture moins importante que ceux qui fraient, ces derniers naissent bien plus grands et robustes et ont des chances de survie bien supérieures. Cette stratégie de reproduction a peut-être été un avantage sélectif crucial à une époque où les prédateurs marins abondaient.



Des fossiles d'*Austrophyllolepis*, un poisson placoderme d'Australie, ont révélé que les mâles avaient sur la ceinture pelvienne des extensions recouvertes de chair – les ptérygopodes –, qu'ils inséraient dans les femelles pour y introduire le sperme.



Certains fossiles de placodermes, tel un spécimen de l'espèce *Materpiscis* (ci-contre), contenaient des embryons fossilisés. Cela prouve que ces poissons donnaient naissance à des petits entièrement formés, contrairement à leurs ancêtres, qui déposaient leurs œufs dans le milieu extérieur.



P. Brazeau / Institut d'histoire naturelle (Université de Göttingen)

L'une des preuves les plus convaincantes de cette nouvelle vision a été apportée par des études réalisées par Martin Cohn, de l'Université de Floride. Celui-ci a montré en 2004 que le gène *Hoxd13*, impliqué dans le développement des nageoires pectorales et pelviennes des poissons à mâchoires « modernes », est aussi actif dans le développement des membres et des organes génitaux des mammifères; cela suggère que nos jambes et nos organes sexuels pourraient avoir évolué à partir de la ceinture pelvienne des premiers poissons.

Puisque nous descendons des placodermes, ces caractéristiques anatomiques aussi proviennent de ces poissons. Nous nous sommes demandé quels autres traits anatomiques nous avaient légués les placodermes. Chez les requins « modernes », les mâles doivent

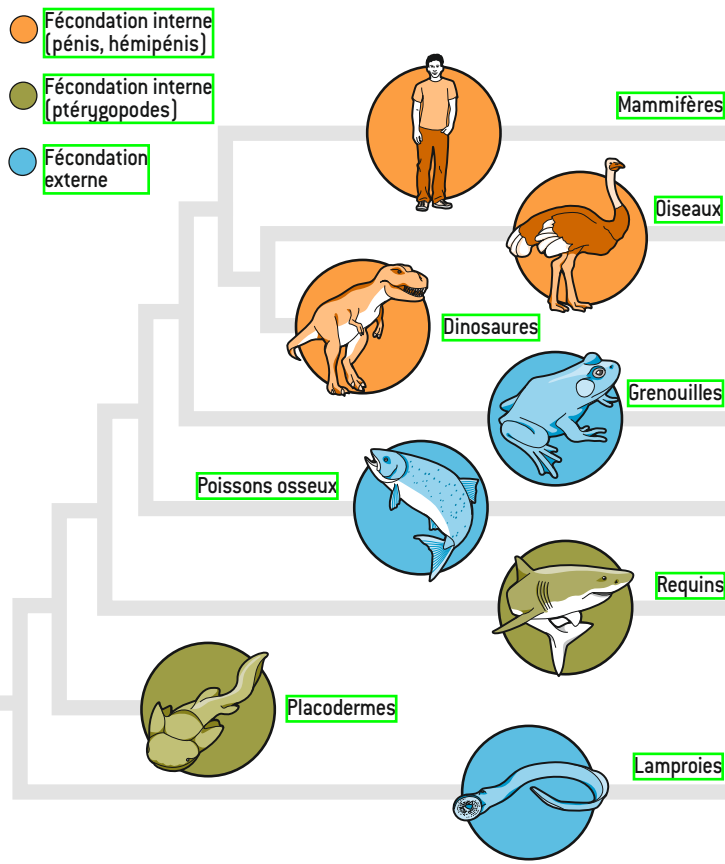
faire leur cour aux femelles avant de pouvoir s'accoupler avec elles. Chez certaines espèces, telles que le requin à pointes blanches de récif, le mâle fait des avances en mordant le dos de la femelle, sa nuque puis ses nageoires pectorales – un mouvement qui lui permet ensuite de se tenir contre elle pendant la copulation.

Cette observation nous a conduits à l'hypothèse que les mâchoires étaient initialement apparues non pas pour manger, comme les chercheurs le supposent depuis longtemps, mais pour mieux s'accoupler. Après cette innovation évolutive, les mâchoires auraient été utilisées différemment pour mastiquer. Si la plupart des poissons osseux sont revenus au frai (fécondation externe) comme mode de reproduction, et ont donc cessé d'utiliser leurs mâchoires pour s'accoupler, l'innovation de leurs ancêtres placodermes les avait en tout cas préadaptés à la mastication.

Plus tard, la fécondation interne fera de nouveau son apparition chez les vertébrés terrestres amniotes (reptiles, oiseaux et mammifères), les libérant ainsi de la nécessité d'aller se reproduire dans l'eau comme le faisaient – et le font encore – les amphibiens. C'est parce que nous avons appris que la fécondation interne était apparue pour la première fois chez les placodermes (et non chez les requins) et parce que les placodermes sont supposés être les ancêtres des poissons osseux que nous avons pu envisager cette relation entre la copulation et la mastication.

LIENS DE FAMILLE

Les placodermes sont parmi les ancêtres des tétrapodes, c'est-à-dire des animaux à quatre membres, dont font partie les hommes. Bien que la fécondation interne soit apparue avec les placodermes, les poissons osseux qui leur ont succédé ont pour la plupart recommencé à frayer. Cependant, avec l'évolution de certains poissons osseux en tétrapodes, la fécondation interne est réapparue. L'anatomie pelvienne héritée des placodermes (incluant les ptérygopodes qu'ils utilisaient pour la copulation) a alors évolué pour donner les hanches, les pattes postérieures et les organes génitaux externes des tétrapodes. À la place des ptérygopodes, les tétrapodes ont développé des hémipénis ou des pénis, d'origine urogénitale. Le schéma ci-dessous indique les modes de reproduction prédominants pour les principaux groupes de vertébrés.



Gros succès évolutif

Sur le plan évolutif plus général, nous avons remarqué que l'époque de l'apparition de la copulation chez les vertébrés coïncide avec celle de l'explosion de la diversité des arthroïdes – la première grande diversification évolutive des animaux à mâchoires inscrite dans le registre fossile.

Ce passage du frai à la fécondation interne a-t-il été le moteur principal de cette importante spéciation? Nos recherches dans la littérature scientifique ont apporté certains indices intéressants. En 2004, Shane Webb, de l'Université de Saint Andrews en Écosse, et ses collègues ont rapporté qu'une famille de poissons, les Goodéidés, qui peuplent actuellement les torrents du Nevada et du centre-ouest du Mexique, s'est séparée en deux lignées il y a environ 16,8 millions d'années. L'une de ces lignées a continué à frayer dans l'eau et a donné naissance à quatre espèces seulement. L'autre a développé une forme de fécondation interne et comprend aujourd'hui 36 espèces.

Un autre groupe de poissons, les *Bythitoidei*, qui comprend trois lignées, présente un schéma similaire. La lignée qui a développé une fécondation interne compte 107 espèces. L'une des deux autres lignées ayant conservé le frai inclut 22 espèces, tandis que l'autre en comprend seulement trois. Le fait que dans ces deux groupes de poissons, les Goodéidés et les *Bythitoidei*, les lignées passées à la fécondation interne se soient bien plus diversifiées appuie notre hypothèse.

À première vue, l'idée que la fécondation interne ait entraîné la diversification évolutive des arthrodires semble contre-intuitive. Le frai crée en effet des dizaines de milliers d'œufs, donc *a priori* beaucoup plus de descendants que la copulation et la mise au monde de quelques jeunes entièrement formés, pour lesquels la mère investit beaucoup d'énergie. Et plus la progéniture est importante, plus grandes sont les chances que l'un des descendants hérite d'une combinaison de gènes pouvant conduire au début d'une spéciation.

Cependant, au cours du Dévonien, la plupart des poissons se nourrissaient d'autres poissons, de sorte que les minuscules petits tout juste nés du frai représentaient des proies faciles. Produire moins de descendants, mais des descendants de plus grande taille capables de fuir ou de se défendre, donne de meilleures chances de survie aux jeunes, qui parviennent ainsi plus souvent à l'âge de se reproduire. Ce nouveau mode de reproduction pourrait donc avoir conféré aux arthrodires un avantage sélectif notable.

Protection rapprochée des œufs

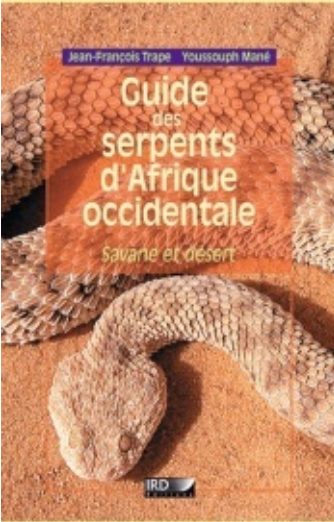
De nombreuses questions sur l'origine et l'évolution de la fécondation interne chez les vertébrés restent sans réponse. On ignore par exemple comment exactement les placodermes ont abandonné le frai pour la fécondation interne. Je ne peux que conjecturer la nature de ce changement. Cela a pu commencer par la sélection d'un comportement consistant pour les mâles et les femelles à frayer côte à côte, l'avantage de cette proximité étant un taux de fécondation plus élevé et la protection assurée aux œufs fécondés. Une étape intermédiaire est aussi envisageable : au lieu de déposer les œufs dans l'eau, la femelle ou le mâle aurait porté la masse d'œufs, comme le font les hippocampes qui couvent leurs œufs dans des poches incubatrices.

L'utilisation de nageoires pelviennes pour transférer le sperme avec plus de précision à la masse d'œufs a peut-être amené le mâle à se rapprocher de la femelle. Cette adaptation aurait créé une pression de sélection conduisant à des lobes de nageoires pelviennes plus grands et plus allongés, devenus *in fine* des ptérygopodes.

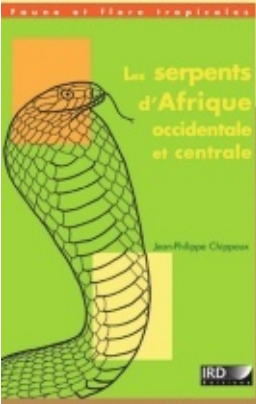
Quels sont les facteurs neurobiologiques qui ont rendu les mâles désireux d'insérer des parties de leurs nageoires pelviennes dans les femelles lors de l'accouplement ? L'apparition de cette pulsion résulte peut-être de la pression de sélection, qui poussait le mâle à féconder les œufs au plus vite, avant que la femelle ne les ait émis, notamment en raison de la compétition avec les autres mâles. Des études complémentaires des signaux chimiques et des déclencheurs neuronaux qui régissent le comportement d'accouplement des requins et des autres poissons pourraient nous éclairer sur l'apparition de cette première étape évolutive vers la copulation. ■


Institut de recherche pour le développement

Un éditeur pour le développement



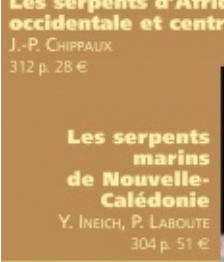
Guide des serpents d'Afrique occidentale
Savane et désert
J.-F. TRAPE, Y. MANÉ
228 p. 29 €



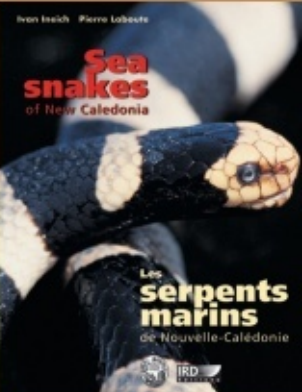
Les serpents d'Afrique occidentale et centrale
J.-P. CHIPPAUX
312 p. 28 €



Venins de serpent et envenimations
J.-P. CHIPPAUX
288 p. 28 €



Les serpents marins de Nouvelle-Calédonie
Y. INEICH, P. LABOUTE
304 p. 51 €



Sea snakes of New Caledonia
Y. INEICH, P. LABOUTE
304 p. 51 €

Diffusion libraires : Eyrolles/Géodif
Vente 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



L'ESSENTIEL

✓ Le serpent à tentacules est un petit serpent aquatique qui vit en Asie du Sud-Est. Il porte deux appendices, situés de chaque côté de ses narines.

✓ En cherchant le rôle des tentacules, l'auteur a découvert que ce serpent dispose dès sa naissance de plusieurs stratégies complexes de chasse.

✓ Le serpent anticipe les déplacements de ses proies, un comportement qui est inné.

✓ Ses tentacules captent les vibrations de l'eau causées par les poissons.

Kenneth Catania

Le serpent à tentacules, un tueur né

Le serpent à tentacules utilise ses appendices pour repérer sa proie et d'ingénieuses stratégies pour la capturer. Et ce, dès la naissance : son comportement de chasse est ancré dans ses gènes.

L'homme ne devrait jamais sous-estimer les capacités des animaux parfois qualifiés de primitifs ; la complexité du comportement d'un reptile, le serpent à tentacules, en est un exemple surprenant ! Cet animal, *Erpeton tentaculatus*, vit dans l'eau et ne mesure pas plus de 60 centimètres à l'âge adulte. Il est originaire de Thaïlande, du Cambodge et du Sud du Vietnam. Vivipare, il donne naissance directement à des petits indépendants, et il ne se nourrit que de poissons. Son nom lui vient d'une caractéristique physique remarquable : il a un petit tentacule de chaque côté des narines.

J'ai découvert ce serpent il y a environ dix ans dans un aquarium du zoo de Washington, aux États-Unis. Il y était immobile, aux aguets, semblable à un morceau de bois en forme de J, une attitude caractéristique que les serpents prennent quand ils chassent. En l'observant, je me demandai à quoi pouvaient servir ses tentacules dont aucun autre serpent n'est pourvu. Sont-ils des détecteurs de poissons ? À l'époque, on l'ignorait, puis-

que toutes les hypothèses formulées à ce sujet – y compris la mienne – n'avaient jamais été testées de façon expérimentale. Je décidai donc de résoudre le mystère de la fonction de ces tentacules.

Mais à mesure de mes recherches, le serpent à tentacules s'est révélé encore plus intéressant. Il utilise différentes stratégies d'attaques complexes pour capturer ses proies. Même les tout jeunes serpents de cette espèce disposent de ce savoir-faire ; voilà un exemple de comportement inné – et non acquis par apprentissage.

Poussé au suicide ?

Avant de tester mon hypothèse – les tentacules seraient des détecteurs de poissons –, je devais observer avec attention la technique de chasse du serpent. Ce n'était pas facile. Le serpent à tentacules agit à une vitesse incroyable, et la célérité de sa proie, le poisson, est aussi impressionnante. Le combat des deux protagonistes dure à peine 40 millisecondes. Pour observer la scène, j'ai enregistré plusieurs scènes de

chasse avec une caméra rapide qui peut prendre de 500 à 2 000 images par seconde. Puis j'ai regardé les vidéos au ralenti. J'ai alors constaté une chose étrange : le poisson semblait se suicider.

À plusieurs reprises, le poisson se tournait vers les mâchoires du serpent, se jetant parfois dans sa gueule. Cela n'avait aucun sens. Mets de choix de nombreux prédateurs, le poisson est en général un expert de l'esquive. Il a développé des circuits de neurones et une capacité de réaction très rapides, qui lui permettent de détecter l'ennemi et de lui échapper. Lorsqu'il capte les ondes acoustiques et les vibrations de l'eau engendrées par un prédateur, il fuit en six ou sept millisecondes. Pour ce faire, il recourbe son corps, puis se détend, ce qui le propulse loin de son prédateur. Alors pourquoi les poissons fonçaient-ils droit dans la gueule du serpent ?

La réponse est liée à cette posture inhabituelle en forme de J que prennent les serpents quand ils chassent : elle forme une sorte de piège. Les reptiles préfèrent attaquer les poissons qui sont entrés dans la partie concave du J formé par leur tête et l'avant de leur corps (voir la figure 2). En examinant minutieusement les vidéos, j'ai constaté que, juste avant d'attaquer, le serpent déplace une partie de son corps vers sa proie et le plus loin possible de sa propre tête. Il fait alors sursauter le poisson qui bondit dans sa gueule grande ouverte.

J'ai aussi enregistré les sons dans l'aquarium, et j'ai montré que le mouvement du corps du serpent, juste avant l'attaque, propage une onde de pression assez forte pour faire sursauter le poisson.

Cette stratégie est ingénieuse, car elle utilise la rapidité du système nerveux des poissons contre eux. Les poissons ont une paire de cellules géantes, nommées neurones de Mauthner, de chaque côté du cerveau. Leur prolongement ou axone émet des signaux vers le côté opposé du corps du poisson. C'est la rapidité relative de ces deux neurones qui détermine la direction de fuite. Si un son arrive de la gauche, les vibrations stimulent d'abord le neurone de Mauthner gauche, qui à son tour active les neurones moteurs du côté droit du corps:



1. LES TENTACULES COUVERTS d'écailles détectent le moindre mouvement de l'eau à l'approche d'un poisson (photographie obtenue par microscopie à balayage électronique).

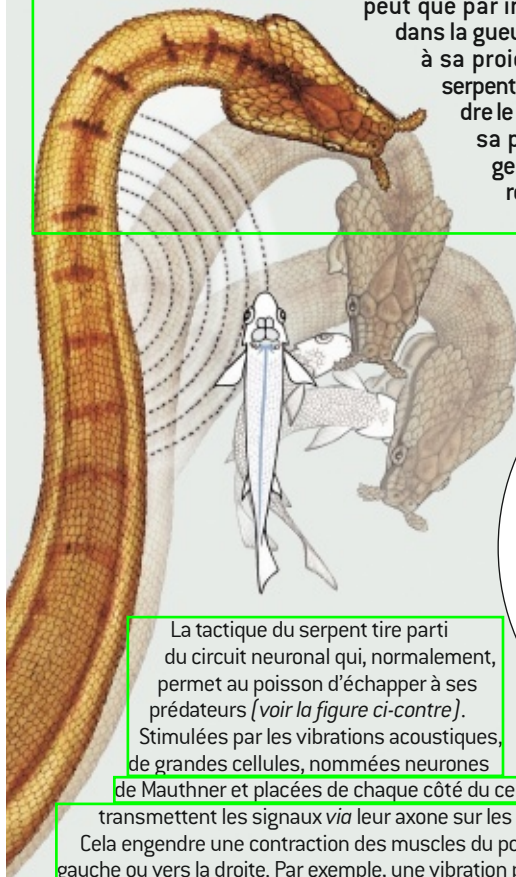
la contraction musculaire qui en résulte courbe le poisson vers la droite.

En même temps, des neurones inhibiteurs empêchent les muscles de se contracter à gauche, de sorte que rien ne s'oppose à l'esquive sur la droite. La fuite est alors rapide, à moins que le poisson ne se trouve près d'un serpent à tentacules... Dans ce cas, le mouvement du corps du serpent déclenche des réactions nerveuses en cascade qui aboutissent à une fuite dans la mauvaise direction. Et l'activation simultanée des circuits inhibiteurs du poisson, qui fonctionnent normalement comme un système de sécurité, ne lui laisse aucune possibilité de revirement.

Cette ruse étonnante du serpent permet d'expliquer le comportement suicidaire du poisson. En 1999, John Murphy, du Musée Field d'histoire naturelle de Chicago, avait déjà constaté l'extrême rapidité avec laquelle le serpent avale le poisson. Mes vidéos montrent que le virage que le poisson effectue permet la plupart du temps au serpent de l'avaler tête la première, la façon la plus rapide pour ce type de prédateurs d'ingurgiter leur proie. Par ailleurs, cette tactique permet au serpent de manger souvent et de ne pas dévoiler son identité: en effet, comment pourrait-il être un morceau de bois inoffensif si d'autres poissons le voient manger? En outre, les serpents ont aussi des prédateurs. Ne pas être aperçu en train d'avaler sa proie diminue le risque d'être lui-même chassé.

UN COMPORTEMENT DE CHASSE COMPLEXE

Le serpent à tentacules, lorsqu'il est à l'affût, tend son piège en adoptant la forme incurvée d'un J. Quand le poisson, peu méfiant, s'engouffre dans la partie concave formée par la tête et le haut du corps, le serpent effectue un mouvement qui propage une onde de pression. Celle-ci fait sursauter le poisson et le fait fuir dans la direction opposée. Si le poisson est placé parallèlement aux mâchoires du serpent lors de cette feinte, il se peut que par inadvertance il atterrisse droit dans la gueule du serpent. S'il fait déjà face à sa proie (voir la figure ci-contre), le serpent anticipe la direction que va prendre le poisson dans sa fuite. Avant que sa proie n'ait eu le temps de bouger, le serpent déplace ses mâchoires à l'endroit même où le poisson se positionnera, prêt à l'avaler.

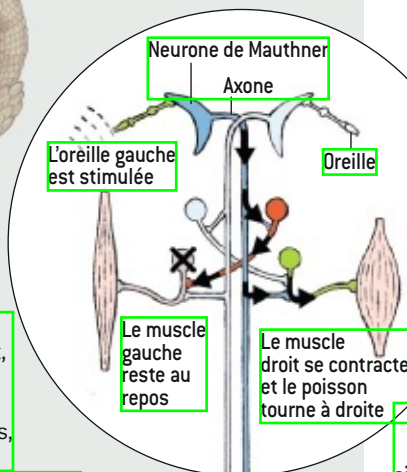


La tactique du serpent tire parti du circuit neuronal qui, normalement, permet au poisson d'échapper à ses prédateurs (voir la figure ci-contre). Stimulées par les vibrations acoustiques, de grandes cellules, nommées neurones

de Mauthner et placées de chaque côté du cerveau,

transmettent les signaux via leur axone sur les flancs opposés du poisson.

Cela engendre une contraction des muscles du poisson qui se tourne alors vers la gauche ou vers la droite. Par exemple, une vibration perçue par l'oreille gauche stimule le neurone de Mauthner gauche, dont l'axone envoie le signal sur le côté droit du corps du poisson: la contraction des muscles à droite dirige l'animal sur la droite. En même temps, des neurones inhibiteurs (en rouge) empêchent les muscles du côté gauche de se contracter, assurant que rien ne puisse entraver le virage à droite du poisson.



Anticiper la fuite

«Quand vous tombez sur quelque chose d'intéressant, abandonnez tout le reste et consacrez-vous à son étude.» C'est dans l'esprit du psychologue américain Burrhus Skinner que j'ai décidé d'étudier le comportement du serpent en tant que prédateur, avant de comprendre le rôle de ses tentacules. Car ce serpent a plus d'une ruse dans son sac.

Bien que le sursaut du poisson vers la gueule du serpent soit impressionnant, il ne fonctionne que lorsque le poisson est situé au bon endroit, entre la tête et le cou du serpent, parallèlement à ses mâchoires. Parce que la réaction de fuite du poisson le propulse soit à droite, soit à gauche, le serpent ne peut pas faire sauter le poisson dans sa gueule si celui-ci est face à ses mâchoires. Que se passe-

t-il alors dans ce cas ? Le serpent à tentacules anticipe la réaction du poisson (voir l'encadré page ci-contre).

D'abord, il utilise une feinte pour l'éloigner de son corps et l'envoyer sur une trajectoire parallèle à ses mâchoires. Puis, avant que le poisson ne bouge, le serpent se dirige vers la future position de sa tête, de sorte que ses mâchoires soient en place avant que le poisson n'arrive. Les événements se succèdent si vite que le serpent ne peut pas utiliser d'informations visuelles pour localiser la proie pendant l'attaque : il doit les anticiper. Dans certains cas, le poisson ne bouge pas ou ne tourne pas dans la direction attendue (une feinte ne réussit pas toujours !), mais le serpent part quand même se placer là où il devrait être pour avaler le poisson (si celui-ci bougeait). Ce comportement confirme que le serpent attaque par anticipation plutôt qu'en pistant sa proie.

La chasse est innée

Parfois, le serpent à tentacules se jette sur un poisson même s'il n'a pas réussi à l'orienter dans la direction escomptée. Toutefois, la plupart du temps, il attend patiemment que sa proie entre dans le piège que représente sa posture en forme de J. J'ai découvert aussi que le serpent a plusieurs types d'attaques anticipées, selon la position du poisson. Par exemple, variant les contorsions, le serpent place sa tête sous son corps pour attraper de face un poisson en fuite. Il semble donc que le serpent choisisse sa stratégie selon la situation. Cette technique d'anticipation soulève une question intéressante : les serpents à tentacules apprennent-ils à anticiper la réaction de fuite du poisson grâce à l'expérience, ou cette capacité est-elle innée, présente dès la naissance ?

Plusieurs des serpents que nous avons au laboratoire ont donné naissance à des petits. Les tests réalisés avec ces serpents nouveau-nés ont montré leur capacité immédiate à anticiper la réaction de fuite du poisson (quand celui-ci est dans la position adéquate) et leur don inné pour les piéger.

En 2010, nous avons observé que cette aptitude innée témoigne de la longue évolution des serpents à tentacules, en tant que prédateurs. Elle soulève une question fondamentale en biologie, celle des rôles respectifs de l'inné et de l'acquis dans le comportement. Le serpent à tentacules se situe à l'extrémité de ce *continuum*, au moins



2. QUAND IL CHASSE, le serpent à tentacules prend une posture en forme de J. Les poissons entrant dans la partie concave de ce J sont alors piégés.

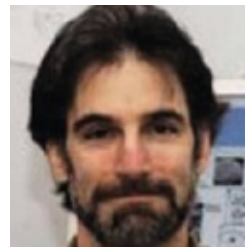
en ce qui concerne la capacité d'attaque des serpents nouveau-nés. La réaction prévisible du poisson aux vibrations soudaines de l'eau a entraîné l'apparition d'un comportement inné du serpent – ses attaques anticipées – qui tire profit d'un autre comportement inné du poisson – ses réactions de fuite.

Le fait que le poisson n'ait pas développé de contre-stratégie suggère que le serpent à tentacules agit, comme l'indiquait le paléontologue américain Stephen Jay Gould, en « ennemi rare » : il exploite un comportement qui, d'habitude, est très bien adapté. Les poissons ont de nombreux prédateurs. En général, ce qu'ils ont de mieux à faire quand ils détectent un mouvement suspect de l'eau, c'est de fuir dans le sens opposé. Et ce n'est vraiment pas de chance s'ils tombent nez à nez avec un serpent à tentacules qui a anticipé leur comportement et les prive d'échappatoire.

Quant aux tentacules du serpent, sont-ils utiles à la chasse ? En 2010, avec mes collègues Duncan Leitch et Danielle Gauthier, nous avons déterminé leur fonction. En examinant l'anatomie des terminaisons nerveuses de ces appendices, leurs réactions à divers types de stimulations, ainsi que la façon dont elles communiquent avec le cerveau, nous avons montré que les tentacules sont des organes très sensibles qui captent le moindre mouvement de l'eau (voir la figure 1).

Nous avons aussi filmé des serpents en lumière infrarouge : ils sont capables d'attraper un poisson sans le voir. Apparemment, les tentacules permettent au serpent de détecter et de capturer sa proie la nuit ou dans une eau trouble, en captant les vibrations dans l'eau. Ce sont donc d'excellents organes sensoriels qui aident le serpent à « voir » les poissons et à les ingurgiter. ■

L'AUTEUR



Kenneth CATANIA est professeur de biologie et neurobiologiste au Département de biologie de l'Université Vanderbilt de Nashville, aux États-Unis.

✓ SUR LE WEB

Vidéo sur le serpent à tentacules : www.ScientificAmerican.com/apr2011/catania

✓ BIBLIOGRAPHIE

K. C. Catania, Born knowing: Tentacled snakes innately predict future prey behavior, *PLoS ONE*, vol. 5, e10953, 16 juin 2010.

K. C. Catania et al., Function of the appendages in tentacled Snakes (*Erpeton tentaculatus*), *Journal of Experimental Biology*, vol. 213, pp. 359-367, février 2010.

K. C. Catania, Tentacled snakes turn C-Starts to their advantage and predict future prey behavior, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 106, pp. 11 183-11 187, juillet 2009.

HISTOIRE DES SCIENCES

La controverse du gaz d'éclairage

En 1823, la construction d'une immense usine à gaz rue du Faubourg Poissonnière, à Paris, déclenche une si vaste polémique que le gouvernement demande une expertise à l'Académie des sciences...

Jean-Baptiste Fressoz

Demandez à tout bon Français qui lit tous les jours son journal dans son estaminet ce qu'il entend par progrès, il répondra que c'est la vapeur, l'électricité et l'éclairage au gaz.

Charles Baudelaire,
Curiosités esthétiques,
Exposition universelle, 1855.

Symbole de progrès au même titre que les machines à vapeur ou le chemin de fer, le gaz d'éclairage fut aussi l'innovation de la première révolution industrielle la plus controversée. Éclairer n'est pas anodin et remplacer le foyer, symbole de la sphère privée, par des becs à gaz reliés au monde industriel par un vaste réseau technique fait partie des transformations technologiques et domestiques que l'on peut qualifier d'historiques, au même titre que l'électricité, la télévision ou Internet. Et bâtir dans Paris, au milieu des habitations, d'immenses et étranges bâtiments nommés gazomètres, contenant des millions de litres de gaz inflammable, n'allait pas non plus se faire sans discussions.

Car à l'inverse des machines à vapeur ou des usines chimiques reléguées dans les faubourgs industriels, à partir de 1816, le gaz d'éclairage conquiert les lieux à la mode, les théâtres et les opéras, les restaurants et les cafés, les salons de lecture et les passages. Le public parisien est donc directement concerné par ses mauvaises odeurs et par le risque d'explosion. D'où l'extension de la controverse : des articles de journaux, des pamphlets, des ouvrages de

vulgarisation, une pièce de théâtre et même un opéra sont écrits pour défendre ou condamner cette innovation. En 1823, l'écrivain romantique Charles Nodier et le médecin Amédée Pichot publient un important *Essai critique contre le gaz hydrogène*. L'innovation est accusée, entre autres, d'enlaidir le monde en supprimant les ombres et leurs mystères, d'infecter Paris en introduisant l'air miasmatique des marais et de faire perdre le contrôle de la lumière en la rendant dépendante du fonctionnement d'un vaste réseau technique. Nodier et Pichot imaginent ainsi la panique dans un théâtre soudain privé d'éclairage. À l'inverse, une publicité de 1823 met en avant la maîtrise que permet le nouveau mode d'éclairage : dans le même instant, grâce au gaz, un homme saute hors de son lit, allume sa lampe et met en joue des brigands, protégeant ainsi le lit conjugal.

L'utilisation du gaz à des fins insurrectionnelles est aussi débattue. À Londres, le Parlement se demande si des insurgés pourraient faire exploser un gazomètre. Dans le Paris des années 1820, théâtre d'attentats et de complots contre le roi (une dizaine sont déjoués entre 1820 et 1823), le nouveau mode d'éclairage, avec ses tuyaux souterrains conduisant une matière explosive, semblait particulièrement menaçant.

En 1823, la controverse se focalise sur un énorme gazomètre que la Compagnie française du gaz d'éclairage, sous la direction d'Antoine Pauwels, a installé rue du Faubourg Poissonnière, un quartier de Paris très en vogue à l'époque. En examinant les raisons

et arguments des partisans et des opposants de ce gazomètre, nous allons voir que l'histoire des controverses techniques est bien plus riche qu'un simple duel entre conservateurs et progressistes.

Explosif en pratique... et en politique

Contenant 5 500 mètres cubes de gaz, ce réservoir est dix fois plus volumineux que les plus grands gazomètres construits par les ingénieurs anglais, qui jouissaient pourtant d'une expérience bien plus longue. Les habitants du quartier Poissonnière qui s'opposent à Pauwels emploient un argument analogue à notre principe de précaution. Certes, admettent-ils, une explosion est improbable, mais ses conséquences seraient telles (certains imaginent Paris entièrement rasé) qu'on ne peut accepter aucune incertitude et il est donc nécessaire d'interdire les gazomètres dans Paris. Malgré les rapports rassurants des académiciens, les opposants défient le gouvernement de prendre la responsabilité morale de l'incertitude scientifique, aussi infime soit-elle.

Politiquement, le gazomètre est aussi un objet explosif. En 1821, le gouvernement libéral du duc de Cazes, renvoyé par Louis XVIII, a cédé le pouvoir à un gouvernement ultraroyaliste. Or le gazomètre, autorisé par le gouvernement précédent, a été financé par des hauts partisans du parti libéral, des nobles d'empire et des francs-maçons – bref, par ceux que déteste le nouveau pouvoir en place. Aussi, lorsqu'en



© Petit Palais / Honor-Viollet

1. L'USINE À GAZ DE COURCELLES, à Paris, huile sur toile d'Ernest-Jean Delahaye (1855-1921). Derrière les vapeurs, on distingue, au fond à droite, la silhouette du gazomètre de l'usine, où est stocké le gaz d'éclairage produit. Celui-ci est fabriqué à partir de houille : chauffé dans des cornues

à gaz, le charbon est transformé en coke et en gaz impur, lequel est purifié par refroidissement (le gaz d'éclairage s'échappe, tandis que les déchets – goudron et eau ammoniacale – se condensent) et acheminé vers le gazomètre, une immense cloche retournée sur une cuve remplie d'eau.

septembre 1823, le Conseil d'État casse l'autorisation administrative accordée à Paulwels, la presse libérale crie au scandale : sous prétexte de sécurité, y lit-on, le gouvernement menace de destruction « ce monument honorable de l'industrie nationale » pour de sordides raisons politiques.

Savants français versus témoins anglais

Consultés par le gouvernement pour savoir s'il convient d'interdire les usines à gaz dans les villes, les académiciens français réduisent les gazomètres à un modèle physique simple : le gaz n'explose que lorsqu'il est mélangé avec 4 à 12 fois son volume d'air. Mais puisque les gazomètres sont sous pression, l'air ne peut pénétrer à l'intérieur. Le gaz étant aussi beaucoup plus léger que l'air, le mélange ne se ferait qu'au bout de longues heures. De sur-

croît, poursuivent-ils, la foudre n'est pas à craindre, car, le gaz n'étant pas conducteur d'électricité, la décharge électrique serait conduite par la cloche du gazomètre dans la cuve remplie d'eau qui la supporte. Enfin, les conduites de gaz ne peuvent communiquer d'incendie, car – des expériences l'ont prouvé – une flamme ne peut passer dans un tuyau plus long que son propre diamètre.

Ensuite, les académiciens raisonnent d'une manière analytique. L'événement « explosion d'un gazomètre » est conçu comme la conjonction de sous-événements : une dépressurisation dans le gazomètre, une ouverture dans la cloche, une longue période sans surveillance pour que le mélange se fasse convenablement et, enfin, la présence d'une flamme dans le mélange. Comme chaque événement est supposé improbable, leur conjonction est *de facto* « absolument improbable » ou « chimérique ».

L'AUTEUR



Jean-Baptiste FRESSOZ est historien des sciences, des techniques et de l'environnement, maître de conférences au Collège impérial de Londres.

Cette façon de raisonner n'est pas celle des experts anglais. Ces derniers refusent souvent de donner un avis. Selon le chimiste Humphrey Davy, la différence d'échelle entre le laboratoire et les gazomètres empêche de prévoir le comportement de ces derniers. Le comité de la Chambre des communes organise l'audition d'un grand nombre d'acteurs du gaz aux profils différents : des scientifiques, des ingénieurs, les directeurs des compagnies et même quelques opposants qui ne se privent pas de contredire les experts trop confiants. Le comité parlementaire pointe aussi les oppositions entre les experts.

Au contraire, la procédure d'expertise des académiciens français réduit les oppositions au silence et renforce l'impression de certitude. Le brouillon du rapport indique pourtant que les désaccords ont été présents tout au long de la rédaction. Sur de nombreux points, les académiciens Thénard et Héron de Villefosse s'opposent à leurs collègues Gay-Lussac, Cordier, Prony et Dulong, beaucoup plus optimistes. Plusieurs membres de l'académie, dont le chimiste Louis-Joseph Gay-Lussac, sont d'ailleurs financièrement intéressés au gaz d'éclairage.

Ces pratiques différentes produisent des résultats de qualités inégales. Outre-Manche, en auditionnant des mécaniciens qui mani-

pulaient au jour le jour les gazomètres, le comité de la Chambre des communes recueille des informations précises sur de nombreux problèmes concrets. Par exemple, la chaleur dégagée par les cornues de distillation entraîne la dilatation du gaz contenu dans la cloche ou, à l'inverse, le froid peut faire geler l'eau sous la cloche, obligeant les ouvriers à recourir au feu pour remettre en marche le système. Bref, des problèmes pratiques que les académiciens français n'ont pas envisagés. L'ironie de l'histoire est que les académiciens purent, avant de rédiger leur rapport, lire le compte rendu du comité anglais et prescrire ainsi de bonnes mesures de sécurité, plagiées des propositions des ingénieurs anglais : la mise en place d'une ventilation continue, l'utilisation de matériaux inflammables, la suppression du goudron dans les cuves ou la recherche de fuites avec de l'eau savonneuse.

Qui avait raison ?

Le rapport des académiciens et le règlement de 1824 consacrent la victoire de Pauls. Son gazomètre reste autorisé. Mieux, il crée un précédent : la loi érigée pour la France entière est conçue pour lui convenir. Le rapport ne préconisant pas de distance de sécurité et laissant libre la taille des gazomètres, l'ordonnance autorise l'im-

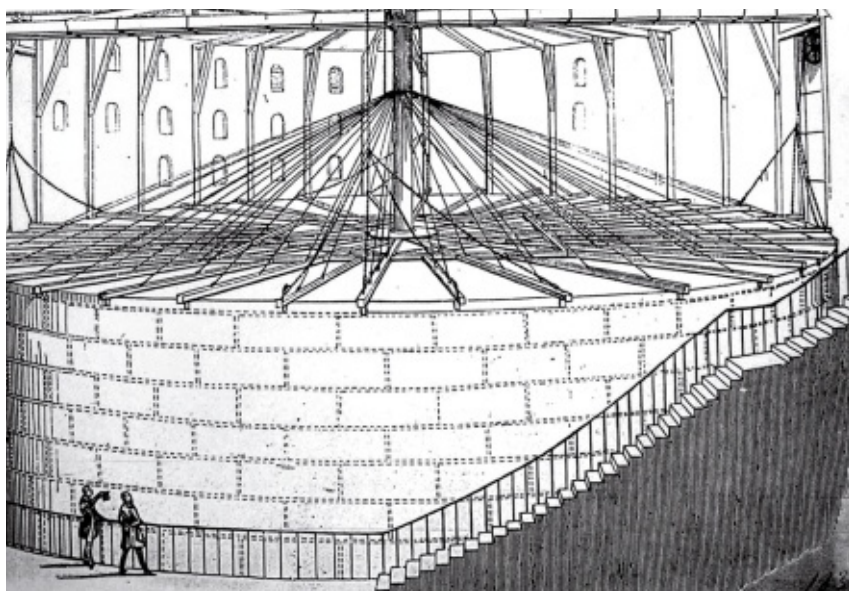
plantation de gazomètres gigantesques au milieu de toutes les villes de France !

Qui des opposants ou des académiciens avait raison ? Les adversaires du gaz critiquaient surtout l'implantation de gazomètres en ville, insistant, malgré les dénégations des entrepreneurs et experts, sur la possibilité d'une explosion. L'avenir leur donna raison : dès 1844 et 1849, des gazomètres explosaient à Paris. Et en 1852, le gouvernement ordonnait que les nouveaux gazomètres soient construits hors les murs. Mais cette décision tardive ne diminua guère le danger : avec l'extension rapide de l'agglomération parisienne, des usines à gaz aussi éloignées que La Villette ou Ivry furent vite cernées d'habitations. La décision du ministre revint donc à préserver la capitale et à cantonner le risque dans les faubourgs industriels.

Les opposants avaient aussi raison quand ils dénonçaient la toxicité du gaz. Le danger était même plus grand qu'ils ne l'avaient imaginé : en 1823, on redoutait l'insalubrité et le risque d'asphyxie. Or les premiers cas d'empoisonnement au gaz montrèrent que de petites quantités pouvaient tuer : le gaz n'était pas seulement irrespirable, il était toxique.

En outre, les interruptions d'éclairage dans les salles de spectacles causèrent effectivement des centaines de morts. En 1858, 15 personnes furent piétinées au théâtre Victoria de Londres lors d'une panique suscitée par l'interruption du gaz. En 1881, à l'opéra de Nice, le gaz d'éclairage mit feu au décor. Le gaz fut éteint afin d'éviter une explosion, mais, dans la panique, plus de 200 personnes périrent asphyxiées, brûlées ou étouffées. Ce scénario se répéta la même année au Ring de Vienne, où 609 personnes moururent.

Enfin, de nombreux accidents ne furent prévus ni par les opposants ni par les experts – et ne pouvaient guère l'être. Le système créait des effets parfaitement inattendus. Par exemple, jusque dans les années 1880, certaines explosions de gaz étaient inexplicables, car elles avaient lieu sans présence de flamme. On découvrit avec surprise que le gaz mal épuré pouvait contenir de l'acétylène qui, réagissant avec le cuivre des conduites, formait de petites quantités d'acétylure de cuivre, lequel détonait par simple choc. Il fallut



2. LE GAZOMÈTRE construit au 97 rue du Faubourg Poissonnière, à Paris, en 1821.

interdire les conduites de cuivre et surveiller la présence d'acétylène dans le gaz.

Des technologies de différentes générations pouvaient interagir de façon inattendue. Le 12 juillet 1883, une série d'explosions manquent de faire s'effondrer plusieurs immeubles au carrefour de la rue François-Miron et de la rue du Pont-Louis-Philippe, à Paris. Un café est détruit et on dénombre 86 victimes. Cette fois encore, les causes sont complexes et, à vrai dire, mal élucidées, la Compagnie parisienne d'éclairage et l'Administration des eaux de Paris se rejettent la faute. L'accident semble dû au croisement de plusieurs réseaux techniques : une fuite d'eau ayant creusé une cavité, un conduit de gaz à proximité se trouve privé de soutien, s'affaisse et se brise. Or le gaz libéré ne peut s'échapper à travers les pavés, remplacés par du macadam imperméable. Il se déverse dans les égouts et les caves pendant plusieurs jours avant de causer la série d'explosions. On constate le caractère imprévisible d'un enchaînement de causes inimaginables en 1823.

La construction sociale de la sécurité

La controverse n'a pas été inutile pour autant. Le règlement de 1824 qui en a découlé définissait un standard minimum de sécurité. S'il est difficile de cerner son rôle dans la sécurisation de l'éclairage au gaz (il faudrait pour cela savoir quel aurait été l'état de la technique sans ce règlement), l'état des gazomètres londoniens dans les années 1820 fournit un point de comparaison. En Angleterre, aucune des précautions proposées suite à l'enquête parlementaire n'a pris force de loi, et le souci d'économie nuit souvent à la sécurité des installations. Ainsi, à l'usine londonienne de Whitechapel, des sacs goudronnés de 400 mètres cubes font office de gazomètres. Dans l'usine de Brick Lane, d'anciens fûts de bière sont recyclés en gazomètres. À Manchester, pour économiser la construction d'un bassin, les gazomètres flottent dans des mares ! Le bois est aussi souvent préféré à la fonte, pourtant moins chère outre-Manche.

L'histoire du gaz d'éclairage à Paris et à Londres est riche d'enseignements sur les



3. L'USINE À GAZ DE LA VILLETTE en 1878, entourée d'habitations.

controverses techniques. D'une part, la sécurisation de la technique dépend surtout de la mobilisation des opposants. Même s'ils ont perdu la bataille, les opposants au gaz ont réussi à transformer un problème de voisinage en une question de sûreté publique ; ils ont ainsi donné le coup d'envoi à la réglementation du gaz en France. D'autre part, la comparaison des expertises française et anglaise sur le gaz témoigne de la nécessité d'ouvrir les procédures d'expertise à une grande variété d'acteurs et de compétences.

Enfin, l'histoire du gaz est emblématique de l'imprévisibilité radicale de la technique. Bien que démantelées depuis un siècle, les usines à gaz des années 1820 continuent de polluer : les goudrons issus de la distillation du charbon qui ont contaminé les sols contiennent des hydrocarbures que la médecine contemporaine a reconnus comme cancérigènes. Jeter l'opprobre sur les experts des années 1820 qui n'ont pas su prévoir ces dangers n'aurait aucun sens. En revanche, la comparaison historique de ce que l'expertise prévoyait avec ce qui est advenu rend plus tangible le sens du mot « incertitude » utilisé aujourd'hui à propos des technologies contemporaines. La technique et ses circonstances ont déjoué tous les pronostics. Le seul vainqueur de la controverse a été l'imprévisible.

✓ À ÉCOUTER

Jeudi 7 juillet 2011, Jean-Baptiste Fressoz évoquera la controverse dans la partie « Actualités » de l'émission **La marche des sciences**, sur *France Culture* de 14h à 15h. www.franceculture.com

✓ BIBLIOGRAPHIE

J.-B. Fressoz, *L'apocalypse joyeuse, une histoire du risque technologique*, Seuil, à paraître, janvier 2012.

J.-B. Fressoz, *The Gas-lighting controversy. Technological risk, expertise and regulation in nineteenth century Paris and London*, *Journal of Urban History*, vol. 33, n°5, pp. 729-755, 2007.

www.pourlascience.fr Retrouvez plus de détails sur la controverse

LOGIQUE & CALCUL

Le défi des faibles complexités

*Comme les très petites durées ou longueurs,
les faibles complexités sont délicates à estimer.
Paradoxalement, leur évaluation exige des calculs colossaux.*

Jean-Paul DELAHAYE

Prenons un objet défini par un grand nombre de données, par exemple une photo numérique ou le texte d'un livre. Le bon sens nous souffle que plus grande est la quantité d'information nécessaire pour décrire l'objet, plus il est « complexe ». Le corollaire est que plus votre objet est complexe, plus sa transmission prendra du temps.

Si l'image à laquelle nous nous intéressons est toute noire (par exemple un carré d'un million de pixels noirs), la brève description « l'image a pour dimension $1\,000 \times 1\,000$ et tous ses pixels sont noirs » suffit pour la connaître avec une parfaite précision. Dans le cas d'une photographie de visage, même les meilleures méthodes de description exigeront des milliers de bits d'information. Le visage est plus complexe et la valeur de cette complexité déterminera le coût de la transmission.

Les théoriciens ont précisé cette façon naturelle et intuitive d'envisager la complexité d'une suite de 0 et de 1. C'est le concept de complexité introduit vers 1965 en même temps par Andreï Kolmogorov et Gregory Chaitin. La complexité de Kolmogorov d'un objet numérique s est la taille $K(s)$ du plus court programme informatique, une description optimale de s , qui, exécuté, reconstitue exactement s . La taille d'un fichier compressé de l'objet s est une mesure de sa complexité. En effet, l'algorithme de décompression, partant de ce fichier, reconstitue toutes les données de l'objet s (on n'envisage ici que la compression sans perte) :

nous considérons donc ce fichier compressé comme un programme dont la taille est approximativement celle du programme le plus court donnant s .

Étudiée depuis la décennie 1960, la complexité de Kolmogorov a été appliquée en physique, en biologie et même en économie. Elle permet de concevoir clairement ce qu'est le contenu en informations d'un objet.

Échec de la complexité de Kolmogorov

Avec la complexité de Kolmogorov, nous savons caractériser mathématiquement une suite aléatoire, ce dont était incapable la théorie classique des probabilités : une suite aléatoire de n bits d'information (une suite de n fois 0 ou 1) est une suite dont la complexité de Kolmogorov $K(s)$ est environ n . Une suite infinie aléatoire est une suite dont aucun début (la suite des n premiers bits) n'est sensiblement compressible. Au contraire, la suite infinie 01010101... n'est pas aléatoire, car on peut définir de façon concise ses $2n$ premiers bits par « n fois 01 ».

Le calcul des valeurs approchées de la complexité de Kolmogorov, grâce aux algorithmes de compression de données sans perte, rend le concept utilisable : la figure 1 propose des exemples de calcul de la complexité de Kolmogorov pour des images numériques. Certaines méthodes de classification de textes, de musiques et

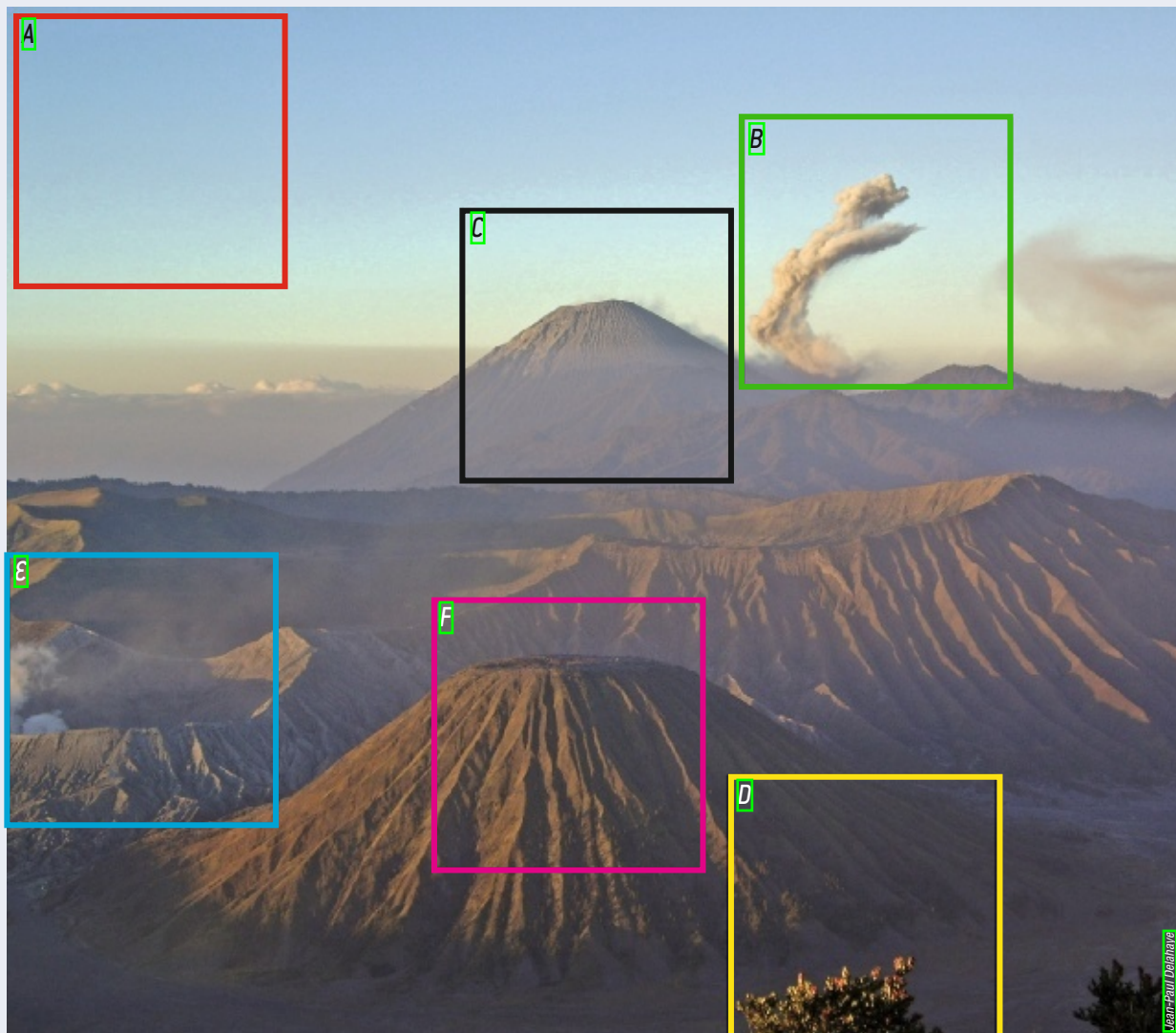
de séquences génétiques ont été déduites d'algorithmes de compression de données.

Cette théorie a cependant un défaut : elle ne permet de mesurer la complexité d'un objet s que s'il est assez grand (supérieur à quelques centaines de bits). La raison de cette limitation est que la définition de $K(s)$ dépend du langage de programmation utilisé pour obtenir la « longueur du plus court programme » : selon le langage choisi, la complexité de Kolmogorov subit des variations qui ont peu d'importance lorsqu'il s'agit de longues séquences de 0 et de 1, mais qui enlèvent tout sens aux résultats concernant les petites séquences.

Pourtant, il semble censé d'envisager la complexité de Kolmogorov des séquences courtes. En effet, il paraît clair que, par exemple, la séquence de sept bits 1001101 est plus complexe que la séquence 0000000, et que la séquence 0001000 est d'une complexité intermédiaire à celles des deux précédentes. Nous avons donc une idée intuitive d'un classement par complexité croissante des séquences courtes. Comment faire pour que la théorie donne un sens à ce que notre intuition perçoit, et que cette théorie s'applique à la fois aux séquences courtes et longues ?

Le problème à résoudre est un problème de thermomètre : parmi tous les instruments de mesure qui conduisent à des évaluations de la complexité de Kolmogorov, mais qui diffèrent par des constantes additives, n'y en aurait-il pas un meilleur, ou devant être préféré, au moins sur un plan

1. Comprimer pour mesurer



La complexité de Kolmogorov d'un fichier informatique s est la taille du plus court programme, mesurée en nombre de bits, capable de produire le fichier s .

Un algorithme de compression de données transforme un fichier informatique s en un fichier « compressé » s' . Certains algorithmes sont dits « sans perte », car lorsqu'on décompresse le fichier s' ,

celui-ci redonne exactement le fichier initial s . Ces algorithmes sans perte nous intéressent, car le fichier compressé s' peut être assimilé à un programme minimal. La taille du fichier compressé s' est donc une valeur approchée de la complexité de Kolmogorov du fichier initial s .

Voici une photo du volcan Bromo situé à l'Est de l'île de Java

en Indonésie. Plusieurs parties de l'image de même taille géométrique (mesurée en nombre de pixels) ont été sélectionnées et confiées à un algorithme de compression de données sans perte, l'algorithme PNG.

La taille des fichiers compressés varie en fonction de la complexité de la partie de photo sélectionnée. Le ciel presque uni-

forme (image A) a une complexité de 324 kilo-octets (1 kilo-octet = 8 192 bits). Le panache de projections émis par le volcan (image B) est un peu plus complexe (400 kilo-octets).

Les autres parties sont encore plus complexes : l'image C a une complexité de 416 kilo-octets ; D, de 420 kilo-octets ; E, de 512 kilo-octets ; et F, de 544 kilo-octets.

2. Complexités

Certaines méthodes séduisantes utilisées pour le calcul de la complexité des courtes séquences sont insuffisantes. En effet, elles ne coïncident pas avec la complexité de Kolmogorov quand la longueur des séquences augmente, ce qui est nécessaire pour que la mesure soit satisfaisante.

L'entropie de Shannon est définie par l'expression $-\sum p_i \log p_i$ (où p_i est une fréquence). Avec une suite binaire, cela donne $[-p_1 \log p_1 - p_2 \log p_2]$, où p_1 et p_2 sont respectivement les densités de 0 et de 1 dans la séquence. Avec cette mesure, la suite 0101010101010101 est la plus complexe possible pour une suite longueur 20 (elle a autant de 0 que de 1). Or la suite 10010111010100001011, qui a la même entropie de Shannon et la même longueur, est plus complexe. L'entropie de Shannon ne prend en compte que les fréquences de 0 et de 1 ; ce n'est pas suffisant pour savoir si une séquence est simple ou complexe. C'est une mesure statistique qui ne prend même pas en compte les répétitions.

La complexité par facteurs d'une suites est déterminée par le nombre de facteurs différents qu'on trouve dans s . Un facteur est une suite de symboles contigus. Ainsi, la séquence 00000 possède cinq facteurs différents : 0, 00, 000, 0000, 00000. Elle a comme complexité 5. La séquence 01011 possède les 11 facteurs différents 0, 1, 01, 10, 11, 010, 101, 011, 0101, 1011, 01011 et elle est donc plus complexe.

Cette mesure est mauvaise, car elle attribue à certaines suites régulières une grande complexité. Ainsi, la suite de Champernowne obtenue en écrivant les entiers en binaire les uns derrière les autres (0 1 10 11 100 101 110 111 1000 etc.) met en défaut la mesure par facteurs. Par exemple, la suite 0110111001011101111000 (les entiers jusqu'à 8) n'est pas complexe, car on peut la définir brièvement et pourtant, elle contient un très grand nombre de facteurs. La mesure de complexité par facteurs ne peut pas être adoptée : une mesure générale doit être équivalente à la complexité de Kolmogorov lorsque les longueurs tendent vers l'infini, or ce n'est pas du tout le cas ici.

pratique ? L'instabilité des thermomètres les plus simples (ceux fondés sur la longueur minimale des programmes) les rend inutilisables pour le classement des faibles complexités.

La solution est apparue il y a environ cinq ans. Un thermomètre nouveau, mis au point au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille selon les idées et les programmes de Hector Zenil, donne des réponses satisfaisantes pour les courtes et les longues séquences. Il définit une complexité conforme à l'idée générale de Kolmogorov pour les grandes complexités et classe, comme on l'attend, 0000000, 0001000, 1001101, ou toutes les séquences pour lesquelles notre intuition n'hésite pas.

Le nouveau thermomètre que nous détaillerons possède un défaut : il est extrêmement coûteux en calcul. En pratique, il ne donne de résultats que pour les séquences très courtes et, de ce point de vue, les méthodes par compression restent incontournables. Comme en astronomie où, selon le type d'objets et leur éloignement, on utilise un procédé ou un autre pour évaluer les distances, dans les mesures de complexité, on doit adopter des méthodes hybrides avec recollement de plusieurs procédés.

Un critère fondé sur la probabilité de production

L'idée sous-jacente aux thermomètres pour les basses complexités est fondée sur une propriété remarquable de la complexité de Kolmogorov : plus un objet est simple, plus il est produit fréquemment quand on fait fonctionner un ordinateur en lui donnant des programmes choisis au hasard.

Un langage de programmation universel étant donné (*Java*, *C*, *Pascal*, *Basic* sont de tels langages), nous imaginerons que nous tirons au hasard des programmes écrits dans ce langage (en fait on peut écrire les programmes en binaire et tirer un programme au hasard revient à tirer une suite de 0 et de 1 jusqu'à avoir un programme complet). Nous tomberons souvent sur des programmes grammaticalement incorrects (donc ne fonc-

tionnant pas) ou sur des programmes qui tourneront sans produire aucun résultat. Ces programmes ne nous intéressent pas : seuls ceux qui produisent en sortie une suite finie de 0 et de 1 et s'arrêtent sont pris en compte. Les expériences montrent qu'en procédant ainsi, on obtient plus souvent 0000000 que 1001101 : la probabilité d'obtenir en sortie une suite de grande complexité est plus faible que la probabilité d'obtenir une suite de faible complexité. Cette probabilité se nomme mesure de Solomonoff-Levin, en l'honneur de Ray Solomonoff (1926-2009) et Leonid Levin (professeur à l'Université de Boston), qui ont identifié ce phénomène.

Un théorème, clef des thermomètres pour les faibles complexités, fait le lien avec la complexité de Kolmogorov. Ce théorème affirme que $K[s]$ est environ égal à $-\log_2 SL[s]$, où $\log_2$ est le logarithme en base 2 (on a $\log_2(x) = \log x / \log 2$). En termes mathématiques, $K[s]$ étant une complexité de Kolmogorov définie par un langage de programmation et $SL[s]$ la mesure de Solomonoff-Levin associée au même langage, il existe une constante c , indépendante de la séquence s , telle que :

$$|-\log_2 SL[s] - K[s]| < c.$$

À l'infini, $-\log_2 SL[s]$ et $K[s]$ ne diffèrent au plus que d'une constante fixée une fois pour toutes. La quantité $-\log_2 SL[s]$ est donc aussi intéressante qu'une complexité de Kolmogorov mesurée par les plus courts programmes et coïncide presque avec elle pour les longues séquences.

Le premier avantage à considérer le nombre $-\log_2 SL[s]$ plutôt que $K[s]$ provient de ce que c'est un nombre bien plus stable. En changeant de langage de programmation, ou seulement en modifiant légèrement la définition d'un langage de programmation choisi, nous ferons beaucoup varier $K[s]$ pour les petites séquences, ce qui empêche, nous l'avons vu, de donner un sens à ce qu'on obtient. En revanche, le nombre $-\log_2 SL[s]$ ne varie que très peu. La raison est que ce nombre résulte d'un lissage opéré sur un très grand nombre de données dû au fonctionnement d'une multitude de programmes.

Cependant, l'argument le plus puissant qui fait s'intéresser à la mesure de Solo-

monoff-Levin – $\log_2 SL(s)$ est qu'elle donne ce que nous attendons du classement des séquences courtes : ainsi, les trois séquences 0000000, 0001000 et 1001101 sont classées dans cet ordre. Pour les petites séquences, cette mesure probabiliste est stable et conforme à notre idée de la complexité ; pour les grandes, elle est, d'après le théorème mentionné, conforme à la meilleure mesure de complexité unanimement admise, la complexité de Kolmogorov. Que demander de plus ?

Le calcul de $SL(s)$ s'obtient en faisant fonctionner un très grand nombre de programmes, qui seront soit tirés au hasard, soit pris dans un ensemble de programmes énumérés systématiquement (ce qui revient au même). En cumulant les résultats, on obtient expérimentalement un calcul approché de la distribution $SL(s)$, donc des nombres $-\log_2 SL(s)$ donnant la complexité des petites séquences. Le procédé est le même que celui qu'on appliquerait pour évaluer si une loterie est truquée ou non : on lancerait la loterie un très grand nombre de fois, et, à partir des résultats obtenus, on observerait, par exemple, que le 13 sort plus souvent que les autres numéros. À l'aide d'un grand nombre de tirages, on évaluerait même la probabilité de sortie de chaque numéro et

bien sûr, plus le nombre de tirages expérimentaux serait grand, meilleure serait la précision obtenue pour les probabilités de chaque numéro.

On comprend cependant les difficultés de la méthode. Pour évaluer expérimentalement les probabilités d'une loterie à 20 numéros, il faut faire des milliers de tirages. Pour évaluer le nombre $SL(s)$ pour les 128 séquences binaires de sept chiffres ou les 1024 séquences binaires de longueur dix, il faut faire un nombre de tirages encore plus massif, et la limite de ce qu'on peut envisager pratiquement est rapidement atteinte, quelle que soit la puissance informatique dont on dispose.

Les machines de Turing à la rescousse

Comment H. Zenil a-t-il procédé ? Il a utilisé une machine à calculer aussi primitive que possible, mais suffisamment puissante pour que tout programme puisse y être exécuté. Ces « machines de Turing », introduites par Alan Turing en 1936, jouent depuis un rôle fondamental en informatique théorique et en logique mathématique, car on n'a pas su faire plus simple et plus général pour étudier la notion d'algorithme.

Ces machines constituent un langage de programmation, parce que décrire une machine de Turing est équivalent à écrire un programme informatique. Passer par ces machines est intéressant pour le calcul de $SL(s)$, car elles permettent une programmation d'une redoutable efficacité : des programmes courts mènent des calculs non triviaux (voir la description d'une machine de Turing sur la figure 3).

Le nombre d'états d'une machine de Turing détermine son pouvoir de calcul. Les machines à un état ne peuvent faire que des calculs simples, par exemple inverser les 0 en 1 et les 1 en 0 d'une séquence qu'on leur soumet.

Les machines à deux états sont déjà plus intéressantes. Leur nombre est 10 000 (les formules compliquées de dénombrements de ces machines donnent ce résultat et c'est un hasard qu'il soit un chiffre aussi rond), ce qui bien sûr ne peut donner accès qu'à une vue extrêmement sommaire de $SL(s)$. En faisant fonctionner toutes les machines de Turing à trois états, les choses deviennent plus sérieuses. Ces 7 529 526 machines produisent une approximation de $SL(s)$ qui n'est pas absurde et qui montre qu'on est sur la bonne voie. Par exemple, parmi les suites binaires de longueur

3. La machine de Turing

Une machine de Turing est un mécanisme de calcul qui peut se trouver dans une série d'états internes (ici trois états notés A, B, C). La machine possède une tête de lecture-écriture qui se déplace et modifie une à une les cases d'un ruban infini (une sorte de mémoire externe). En fonction de l'état interne et de ce que la tête de lecture-écriture observe sur le ruban, la machine décide (en suivant des règles constituant le programme de la machine et fixées une fois pour toutes) de changer ce qui est écrit dans la case sous sa tête de lecture-écriture et de se déplacer vers la droite ou vers la gauche d'une unité en passant dans un autre état interne. Voici

une machine à trois états A, B, C possédant un programme de quatre instructions :

- (A, 0 $\rightarrow$ B, 1, droite)
- (B, 0 $\rightarrow$ C, 1, gauche)
- (C, 1 $\rightarrow$ B, 1, droite)
- (B, 1 $\rightarrow$ arrêt)

L'instruction (A, 0 $\rightarrow$ B, 1, droite) signifie que lorsque la machine est dans l'état A et qu'elle lit un 0, alors elle passe dans l'état B en remplaçant le 0 par un 1 et se déplace d'une case vers la droite. Lorsque l'état dans lequel la machine passe est l'état arrêt, elle cesse toute action. La machine donnée en exemple opère un calcul élémentaire : placée sur un ruban infini couvert de 0, elle mène quelques

opérations d'écriture et de déplacements et s'arrête en laissant ...001100... Cette machine produit la séquence $s = 11$. Voyons le détail des calculs.

A

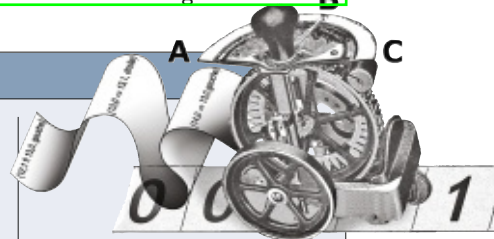
.....0 0 0 0 0 0 0 ...
La machine, dans l'état A, lit un 0. L'instruction (A, 0 $\rightarrow$ B, 1, droite) lui indique qu'elle doit changer le 0 en 1, passer dans l'état interne B et se déplacer vers la droite :

B

... 0 0 0 1 0 0 0 ...
L'instruction (B, 0 $\rightarrow$ C, 1, gauche) lui fait écrire un second 1 et la conduit dans l'état C :

C

... 0 0 0 1 1 0 0 0 ...



L'instruction (C, 1 $\rightarrow$ B, 1, droite)

donne maintenant :

B

... 0 0 0 1 1 0 0 0 ...

L'instruction (B, 1 $\rightarrow$ arrêt) fait

cesser toute activité.

La machine a produit la séquence $s = 11$ sur les cases qu'elle a modifiées. Dans l'évaluation, que l'on fait avec toutes les machines de Turing à trois états, des complexités des suites à deux éléments, cette machine augmentera la probabilité de la séquence binaire 11.

4. Tableau de résultats

Hector Zenil a fait fonctionner les 11019960576 machines de Turing à quatre états et en a déduit, par un énorme calcul sur ordinateur, la fréquence des séquences finies produites. Il a obtenu des valeurs proches de la mesure de Solomonoff-Levin $SL(s)$ reliées à la complexité de Kolmogorov par la formule $K(s) = -\log_2 SL(s)$. Puis H. Zenil a classé par complexité croissante les valeurs approchées de $K(s)$ des séquences courtes.	0	2,285794	1111	8,644805	00000	11,791904	10110	12,755680
	1	2,285794	0001	9,019632	11111	11,791904	01010	12,830138
	00	3,287643	0111	9,019632	00001	12,513528	10101	12,830138
	01	3,287643	1000	9,019632	01111	12,513528	00110	12,946395
	10	3,287643	1110	9,019632	10000	12,513528	01100	12,946395
	11	3,287643	0101	9,029529	11110	12,513528	10011	12,946395
	000	5,735457	1010	9,029529	00010	12,554899	11001	12,946395
	111	5,735457	0010	9,040613	01000	12,554899	00101	12,979816
	001	5,791928	0100	9,040613	10111	12,554899	01011	12,979816
	011	5,791928	1011	9,040613	11101	12,554899	10100	12,979816
	100	5,791928	1101	9,040613	00100	12,694473	11010	12,979816
	110	5,791928	0110	9,263820	11011	12,694473	00011	13,177551
	010	5,867773	1001	9,263820	01001	12,755680	00111	13,177551
	101	5,867773	0011	9,276355	01101	12,755680	11000	13,177551
	0000	8,644805	1100	9,276355	10010	12,755680	11100	13,177551

six, le calcul de $SL(s)$ mené en faisant fonctionner toutes les machines de Turing à trois états et en examinant ce qu'elles produisent indique que les deux séquences les plus probables (donc les moins complexes) sont à égalité 000000 et 111111, ce qu'on attendait. Viennent ensuite dans l'ordre les séquences suivantes :

– 000001 à égalité avec 100000,

111110 et 011111,

– 000100 à égalité avec 001000, 110111

et 110111,

– 001001 à égalité avec 100100, 110110

et 011011,

– 010110 à égalité avec 101001, 100101

et 011010.

Un tel classement est assez subtil, mais naturel : placer un 1 derrière cinq 0 est un peu plus simple que de placer un 1 avec trois 0 devant et deux derrière. Si vous en doutez, comparez la longueur des deux descriptions que je viens de formuler :

– « un 1 derrière cinq 0 »

– « un 1 avec trois 0 devant et deux derrière ».

Cependant, le classement obtenu avec les machines de Turing à trois états ne donne de résultats que pour un petit nombre de séquences, celles qui sont produites par au moins une machine. Il y a 128 séquences différentes ainsi produites. Cela laisse toutes les autres sans probabilité, ce qui revient à considérer que ces autres séquences sont infiniment complexes.

Pour obtenir plus de précision et surtout pour qu'un plus grand nombre de séquences soient classées, il faut sauter un pas et faire fonctionner toutes les 11 019 960 576 machines de Turing à quatre états.

Pour chacune, on doit déterminer ce qu'elle fait en simulant son fonctionnement. Il y a deux possibilités : soit la machine produit une séquence de 0 et de 1 et s'arrête, et alors elle contribuera au calcul de l'approximation de $SL(s)$ (comme un tirage de loterie) ; soit elle ne s'arrête jamais et la machine ne sert à rien. Malgré l'utilisation de plusieurs astuces pour écourter le calcul, les programmes de H. Zenil ont dû fonctionner neuf jours durant, à raison de plusieurs milliers de machines par seconde, pour obtenir cette nouvelle version approchée de $SL(s)$.

Calcul colossal et castors affairés

Le fait que de nombreuses machines calculent indéfiniment sans jamais rien produire a pu être maîtrisé grâce à la connaissance qu'on a du *Castor affairé* à quatre états. On dénomme *Castor affairé* à n états, la machine de Turing à n états qui calcule le plus longtemps avant de s'arrêter. Le *Castor affairé* à trois états calcule durant 21 étapes et donc, toute machine ayant trois états calcule moins de 22 étapes, ou alors calcule indéfiniment. Le *Castor*

affairé à quatre états calcule durant 107 étapes. Le *Castor affairé* à cinq états n'a pas encore été identifié avec certitude, mais on pense qu'il calcule durant 47 176 870 étapes.

Comme le *Castor affairé* à quatre états calcule 107 étapes, toute machine de Turing à quatre états qui ne s'est pas arrêtée au bout de 107 étapes ne s'arrêtera jamais. Lors du calcul de $SL(s)$, on peut interrompre le fonctionnement d'une telle machine, puisqu'il est certain qu'elle ne produira aucune séquence. Cette prise en compte est évidemment essentielle pour ne pas perdre de temps en faisant fonctionner inutilement des machines qui ne contribuent pas au résultat recherché.

Les résultats obtenus avec les machines à quatre états concernent cette fois une volumineuse famille de séquences binaires. Précisément 1 824 séquences différentes sont produites par les machines de Turing à quatre états et ce sont donc 1 824 séquences dont on a su évaluer la complexité par utilisation de l'approximation ainsi calculée de $SL(s)$ et de la formule $-\log_2 SL(s)$ qui détermine leur complexité de Kolmogorov approchée. Notons que cette complexité de Kolmogorov pour séquences courtes est un nombre réel pas forcément entier. C'est en fait un avantage, puisque cela permet d'avoir un classement plus fin avec moins d'*ex aequo*.

Voici quelques observations sur les résultats obtenus :

– Pour les séquences prises en exemple au début de l'article, tout se passe bien. La séquence 0000000 est plus probable que 0001000, qui elle-même est plus probable que 1001101. Les complexités déduites des probabilités pour ces trois séquences sont conformes à ce que l'intuition exigeait.

– Chaque suite ayant une longueur comprise entre 1 et 8 est produite au moins une fois et le calcul approché avec les machines de Turing à quatre états lui attribue une probabilité non nulle, donc une complexité finie.

– Pour les 128 séquences déjà classées par les machines à trois états, le classement obtenu avec les machines à quatre états reste le même, sauf dans 17 cas. En général, les déplacements opérés entre les deux classements conduisent à des positions plus conformes à l'intuition. En considérant des machines à quatre états, on améliore ce qu'on avait obtenu avec les machines à trois états : c'est une validation de la méthode.

– Les séquences produites les plus longues ont pour longueur 16. En voici une : 1101010101010101. Bien sûr, ce sont des suites assez peu complexes, car les suites de longueur 16 les plus complexes ne sont pas produites par une machine de Turing à quatre états.

– En général, plus une séquence est longue, plus sa complexité est grande, mais ce n'est pas une règle absolue : par exemple, la séquence 0000000000 (dix fois le 0) est évaluée moins complexe que la séquence de neuf bits 000011100.

– De petites imperfections persistent. En passant de trois à quatre états, on a notablement progressé, mais pour avoir un classement parfait incluant par exemple toutes les séquences de longueur allant jusqu'à dix, il faudrait maintenant mener un calcul complet avec les machines à cinq états, à la limite de ce qu'on peut envisager aujourd'hui. On espère l'entreprendre prochainement. Bien sûr, il ne correspondra qu'à une marche de plus dans une quête infinie.

Pour disposer d'une méthode pratique qui attribue une complexité à toute séquence finie, il faut accepter d'associer plusieurs idées. Trois idées semblent suffire :

(a) Pour les séquences courtes (jusqu'à huit ou dix bits, peut-être un peu plus), la méthode des machines de Turing ;

(b) Pour les séquences de longueur moyenne (de dix bits à quelques centaines de bits) un découpage en tranches ramenant au cas précédent ;

(c) Pour les séquences plus longues, une méthode à base d'algorithmes de compression.

Recollement délicat

Le travail est délicat et on tombera sur des cas où l'évaluation sera peu satisfaisante. Mais le principe général semble acquis et tout n'est plus qu'une question de perfectionnement et d'efforts : prises en compte de machines de Turing ayant plus d'états ; utilisation simultanée d'une multitude d'algorithmes de compression, etc. Ces efforts n'auront jamais de fin, mais nous disposons maintenant de moyens pour le calcul de la complexité de Kolmogorov des séquences binaires de toutes les longueurs, moyens qu'on adaptera aux séquences plus générales de chiffres décimaux, de lettres, de nombres entiers, etc.

Aujourd'hui, une grande variété de méthodes spécifiques, fondées sur des principes particuliers et bien souvent *ad hoc* sont utilisées pour calculer et comparer des complexités d'objets discrets (voir deux exemples sur la figure 4). C'est le cas en informatique dans le domaine des algorithmes pour suites pseudo-aléatoires, en traitement d'images, en génétique, en linguistique, en psychologie, etc. Les avancées du programme de recherche décrit ici mettront à disposition de tous une méthode générale de calcul de la complexité de Kolmogorov qui, en plus d'être homogène (car l'unité de mesure est toujours le bit d'information), sera fondée sur ce qui est reconnu comme la théorie universelle de l'information. Cette théorie longtemps considérée comme inutilisable (du fait de l'existence de nombreux énoncés indécidables concernant $K(s)$) se révèle au fur et à mesure des années praticable et utile. Il est certain pourtant qu'on est loin d'en avoir tiré toutes les applications possibles.

L'AUTEUR



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

H. Zenil, Pages Internet donnant accès aux articles cités ci-dessous : <http://www.mathrix.org/zenil/>

H. Zenil et J.-P. Delahaye, An algorithmic information theoretic approach to the behaviour of financial markets, themed issue on « Nonlinearity, Complexity and Randomness », *Journal of Economic Surveys*, 2011.

H. Zenil, Compression-based investigation of the dynamical properties of cellular automata and other systems, *Journal of Complex Systems*, vol. 19(1), 2010 : <http://arxiv.org/abs/0910.4042>

J.-P. Delahaye et H. Zenil, A glance into the structure of algorithmic complexity : Numerical evaluation of the complexity of short strings by small Turing machines, 2011 : <http://arxiv.org/pdf/1101.4795>

J.-P. Delahaye et H. Zenil, On the algorithmic nature of the world, dans G. Dodig-Crnkovic et M. Burgin (éds.), *Information and Computation*, World Scientific, 2010.

J.-P. Delahaye et H. Zenil, On the Kolmogorov-Chaitin complexity for short sequences, *Randomness and Complexity : From Leibniz to Chaitin* (C.S. Calude, éd.), World Scientific, pp. 123-130, 2007.

J.-P. Delahaye, Classer musiques, images, textes et génomes, *Pour la Science*, pp.90-95, mars 2004.

ART & SCIENCE

Le ciel se couvre chez Murillo

Sur plusieurs tableaux peints entre le XVI^e et le XVIII^e siècle, le bleu est devenu gris. Dans le pigment utilisé – du smalt –, l'environnement des ions cobalt a été modifié par la fuite des ions potassium.

Loïc MANGIN

Le peintre baroque Bartolomé Esteban Murillo (1617-1682) est, avec Diego Velazquez, Francisco de Zurbarán et José de Ribera, l'un des plus célèbres représentants du Siècle d'or espagnol. Il fut le chef de file de l'école de Séville, second centre artistique de l'Espagne au XVII^e siècle après Madrid où domine Velazquez. Murillo doit sa renommée à plusieurs œuvres religieuses telle *La Vierge du Rosaire*, mais surtout à ses représentations de la vie quotidienne, notamment des portraits de femmes, de pauvres et de mendiants.

De tels sujets ne sont pas propices à une débauche de couleurs vives et, de fait, dans plusieurs tableaux de Murillo, la diversité des couleurs est minimale. Toutefois, certaines toiles n'étaient peut-être pas aussi sombres qu'elles ne l'apparaissent aujourd'hui. Ainsi en est-il de l'œuvre *Deux Trinités*, conservée à la *National Gallery*, à Londres (voir la figure c, page ci-contre). En effet, le ciel gris, au centre, était au départ plus clément, c'est-à-dire bleu. Comment expliquer un tel changement ?

Entre le XVI^e et le XVIII^e siècle, un pigment bleu souvent utilisé était le smalt. Or celui-ci est instable et se décolore en quelques années. Le phénomène était connu dès le XVII^e siècle et était mentionné dans les traités de peinture, mais son mécanisme a longtemps résisté aux explications. Une équipe internationale associant la plateforme européenne de recherche sur les matériaux anciens (IPANEMA), la *National*

Gallery et le C2RMF (CNRS/ministère de la Culture) vient de résoudre l'énigme.

Le smalt était obtenu à partir d'un minerai contenant du cobalt qui était mélangé à de la silice et à de la potasse pour former un verre coloré bleu. Celui-ci était ensuite broyé en une poudre d'un bleu d'autant plus intense que les grains étaient fins.

Depuis le Moyen Âge, la principale source du cobalt utilisé dans la préparation

La coordination tétraédrique des ions cobalt n'est plus assurée ; elle devient octaédrique, et le bleu vire au gris.

du smalt européen était la smaltite, une variété de skutterudite. Il s'agit d'une famille de minéraux cristallins constitués d'atomes de cobalt, de nickel et d'arsenic, dont un gisement important se trouvait près de la ville de Skutterud, en Norvège. À partir du XVI^e siècle, d'autres minerais de cobalt auraient été ajoutés, tels l'érythrite et la cobaltite. Que se passe-t-il dans le smalt une fois qu'il est appliqué sur la toile ?

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer la décoloration, par exemple une migration des cations cobalt. Cependant, l'analyse de microéchantillons

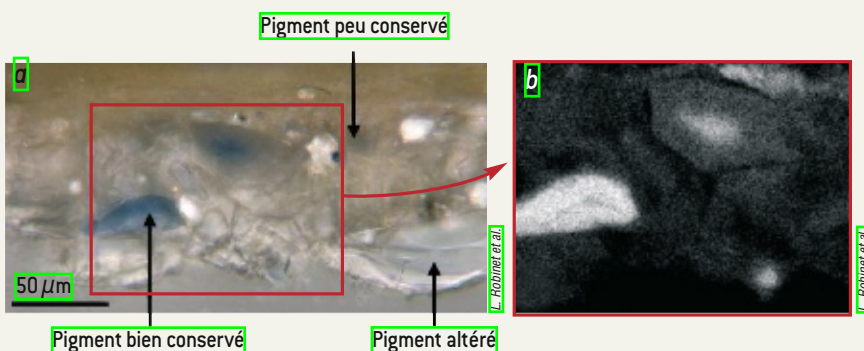
(voir la figure a, où l'on distingue des grains plus ou moins préservés) par spectroscopie d'absorption X sur la station expérimentale LUCIA du synchrotron SOLEIL (CNRS/CEA) a montré que la décoloration résulte d'un changement d'environnement des ions cobalt. Notons que les investigations ont concerné, outre le Murillo, d'autres tableaux : deux de Paolo Veronese (*Les Dieux de l'Olympe* et *La Consécration de Saint-Nicolas*), un de François Lemoyne (*Hercule tuant Cacus*) et enfin, un de Paolo Fiammingo (*Paysage avec l'expulsion des Harpies*). Voyons en détail le mécanisme.

D'abord, la décoloration du smalt est corrélée à une perte de potassium, celui-ci représentant de 12 à 16 pour cent des échantillons bien préservés contre 1 à 2 pour cent dans les plus altérés. Cet appauvrissement en potassium se traduit par un blanchiment des grains lorsqu'ils sont observés par spectroscopie X (voir la figure b). Une telle fuite est connue dans les verres où les ions potassium, mobiles, sont facilement « lessivés » : ils sont remplacés par d'autres types d'ions. Dans la peinture, les ions potassium migraient et s'associaient avec les acides gras de l'huile pour former des savons qui diffusent ensuite vers la surface.

Dans le smalt, les ions cobalt Co^{2+} (les ions Co^{3+} ne sont pas stables à la température requise pour fondre le verre), forment des complexes avec quatre ligands.

La couleur bleue du cobalt dans le smalt est précisément due à cette coordination

Des microéchantillons de peinture (a) observés en lumière visible montrent que certains grains de smalt sont bien conservés tandis que d'autres sont devenus gris. On trouve également des états intermédiaires. La spectroscopie révèle que cette décoloration est liée au potassium (b, plus un grain est blanc, plus il contient de potassium).



tétraédrique, quand le cation Co^{2+} est complexé avec quatre atomes d'oxygène. La stabilité de cette configuration requiert des charges positives supplémentaires qui compensent les charges négatives de l'oxygène. Dans les grains de smalt, ce rôle est dévolu aux ions potassium K^+ .

Le lessivage des ions potassium dans le verre diminue la quantité de cations qui assurent la stabilité de la structure. Les ions qui remplacent le potassium forment des liaisons covalentes fortes avec l'oxygène. L'ensemble de l'édifice est perturbé et la coordination tétraédrique des ions Co^{2+} , responsable de la couleur bleue, n'est pas entretenue ; la distance entre les ions cobalt et les ligands oxygène augmente ; le nombre de ces ligands oxygène passe de quatre à six. Le cobalt est alors dans une coordination octaédrique. Ce changement de coordination se traduit par des modifications des propriétés optiques : le bleu vire au gris !

Malgré cette désagréable tendance à se décolorer, que l'on sait désormais expliquer, le smalt fut très en vogue de Séville jusqu'au Nord de l'Europe : Rembrandt, Vermeer, Holbein l'ont utilisé. Il a néanmoins été concurrencé au XIX^e siècle par les nouveaux bleus de synthèse, de qualité supérieure et, surtout, stables avec le temps.

L. Robinet *et al.*, Investigation of the discoloration of smalt pigment in historic paintings by Co K-edge micro X-ray absorption spectroscopy, *Analytical Chemistry*, à paraître, 2011.



IDÉES DE PHYSIQUE

Scintillations estivales

Zébrures lumineuses dans les piscines, scintillement des étoiles, interruptions des signaux du système GPS: le mécanisme sous-jacent est le même.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Par une belle nuit d'été, regardons attentivement une étoile proche de l'horizon. Nous la voyons scintiller, c'est-à-dire clignoter légèrement. Ce scintillement est-il dû à une limitation physiologique de notre œil qui fixe une source lumineuse très faible ? Pas du tout ; c'est un phénomène physique bien réel, qui a son origine dans les fluctuations de densité de l'atmosphère. Pour le comprendre, plongeons tout d'abord dans la piscine ou la mer et observons les zébrures lumineuses qui animent le fond. Nous nous enlancerons ensuite dans l'espace et verrons pourquoi le signal provenant d'un satellite s'éteint parfois.

Des caustiques au fond de l'eau

Avant qu'il ne fasse nuit, profitons du soleil et de la chaleur pour nous baigner dans la piscine. Nous pourrions remarquer les figures changeantes qui apparaissent au fond de l'eau (voir la figure 1). Ces lignes lumineuses assez nettes et mouvantes s'atténuent lorsque l'eau devient éteale. Elles ont donc pour origine les petites vagues à la surface de la piscine, et la lumière du Soleil bien sûr.

Quel est l'effet de cette non-planéité ? Tout rayon lumineux qui arrive de biais sur une interface air-eau est dévié : il est « réfracté ». Comme l'indice optique de l'eau est supérieur à celui de l'air, l'angle que fait le rayon réfracté avec la perpendiculaire à la surface est inférieur à l'angle d'incidence. Si la surface de l'eau est ondulée, des rayons parallèles, tels ceux

qui nous parviennent du Soleil, sont déviés différemment selon le point d'incidence sur l'interface air-eau.

Prenons le cas d'un Soleil situé au zénith (voir la figure 2). En haut d'une vague, là où la surface de l'eau est convexe, l'effet de la réfraction est de concentrer les rayons, comme le fait une loupe ou une lentille convergente. À la verticale du sommet de cette vague, lorsqu'on descend en profondeur, l'intensité lumineuse augmente. Pour des vagues espacées de 50 centimètres et dont l'amplitude est de 1 centimètre, le rayon de courbure de la surface est d'une soixantaine de centimètres ; les rayons lumineux se focalisent alors à une profondeur de l'ordre de 2,5 mètres. En revanche, dans un creux, là où l'interface air-eau est concave, l'effet est inverse : les rayons lumineux sont divergents et l'intensité lumineuse diminue.

L'analogie avec une lentille suggère que l'image du Soleil ne devrait être nette qu'à une seule profondeur. Tel n'est cependant pas le cas. On voit des structures lumineuses

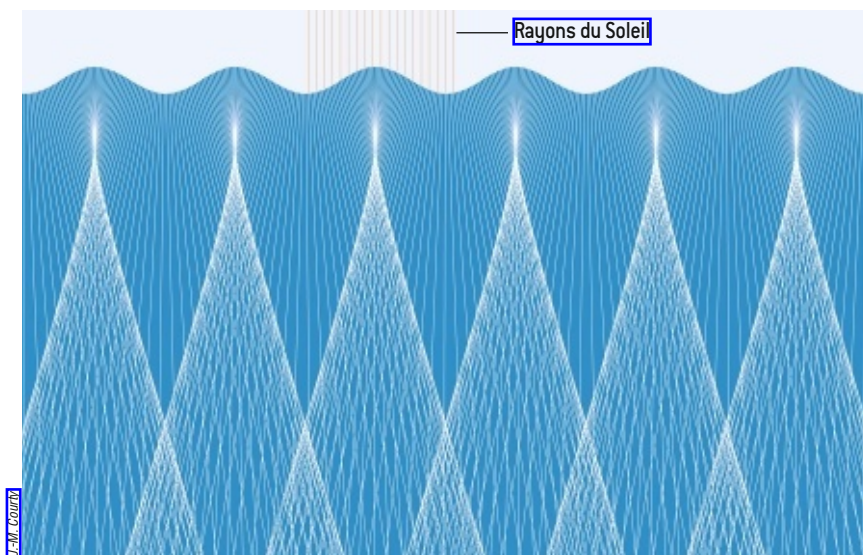
assez nettes à toutes les profondeurs, dès que ces dernières dépassent les longueurs focales en jeu. En fait, la surface de l'eau n'est pas une lentille parfaite. Au lieu d'avoir une focalisation parfaite en un ou plusieurs points et une divergence des rayons au-delà, la lumière se concentre sur une région de l'espace plus ou moins étendue et aux contours assez marqués, dont la forme dépend de la situation géométrique.

Une telle région de concentration lumineuse est appelée caustique. Son intersection avec une surface fait apparaître des figures plus ou moins intéressantes. Les zébrures changeantes que l'on voit sur le fond de la piscine en constituant un bon exemple. Une autre caustique remarquable est la courbe lumineuse en forme de cœur que l'on aperçoit parfois dans une tasse de café ou dans un verre de boisson (voir la figure 1) : elle est formée par la réflexion des rayons lumineux sur la paroi interne (et circulaire) du récipient.

Quel est le lien avec le scintillement des étoiles ? De même que la surface d'une piscine n'est pas plane, l'atmosphère n'est pas un milieu uniforme. La température y varie d'un point à un autre et d'un instant à l'autre, la variation étant d'environ 0,1 à 1 °C sur une échelle de l'ordre du mètre. Il en découle des variations de densité de l'air, donc de l'indice optique, certes faibles (de l'ordre du milliardième), mais qui se manifestent sur toute l'épaisseur de l'atmosphère. Tout se passe comme si l'atmosphère était constituée, à chaque instant, d'une superposition de lentilles de tailles et de longueurs focales variées.



1. SELON LES SURFACES RENCONTRÉES et les milieux traversés, la lumière du Soleil peut se concentrer dans certaines régions, nommées caustiques. Les zébrures lumineuses au fond d'une piscine et la courbe brillante en forme de cœur dans un récipient circulaire en sont des exemples.



2. UN RAYON SOLAIRE VERTICAL SE RÉFRacte différemment selon son point d'incidence à la surface de l'eau, supposée ici sinusoïdale. On voit alors que l'intensité lumineuse, que traduit la densité en rayons, se concentre sur certaines régions de l'espace. On remarque aussi qu'au-delà d'une certaine profondeur, on a toujours des concentrations lumineuses aux bords bien marqués.

Ces lentilles sont susceptibles de concentrer ou au contraire de disperser la lumière de l'étoile que l'œil capte et qui est entièrement contenue dans un très fin cylindre dont la base est l'ouverture de notre pupille, soit 0,5 centimètre de diamètre (voir la figure 3). L'effet de toutes ces lentilles se cumule sur le trajet de la lumière lors de sa traversée de l'atmosphère. Au gré de l'agitation de l'air, les perturbations que rencontre le rayon lumineux évoluent et se déplacent ; il s'ensuit que l'intensité lumineuse varie de façon aléatoire au cours du temps, d'où le scintillement.

Une étoile scintille, mais pas une planète

Pour que la fluctuation d'intensité de la lumière d'une étoile soit notable au niveau du sol, il faut que les focales des lentilles atmosphériques soient comparables à l'épaisseur de l'atmosphère traversée, soit de l'ordre de 100 kilomètres (la concentration lumineuse étant maximale au foyer d'une lentille). On montre que la distance focale associée à une perturbation d'indice optique est inversement proportionnelle à la variation d'indice. Il en résulte que seules

les perturbations à l'échelle d'une dizaine de centimètres ou moins contribuent au scintillement.

Ce chiffre a son importance, car il explique pourquoi les planètes visibles à l'œil nu ne scintillent pas. Contrairement aux étoiles, tellement lointaines qu'on peut les considérer comme ponctuelles, les planètes ont un diamètre apparent de l'ordre de quelques dizaines de seconde d'arc.

Les rayons réfléchis qui parviennent à notre œil de deux points diamétralement opposés de la surface d'une planète sont alors écartés d'une dizaine de centimètres à un kilomètre de distance de notre œil, et de un mètre à dix kilomètres de distance. C'est plus que la taille caractéristique des perturbations responsables du scintillement. Par conséquent, les différents points de la planète scintillent de façon indépendante et, par un effet de moyenne sur tous ces points, le scintillement est fortement réduit. Notre œil ne le perçoit plus. Seuls des instruments spécifiques peuvent le mesurer ; ils permettent ainsi d'étudier les fluctuations de l'atmosphère.

Ces effets ne sont pas réservés à la lumière visible. Ils concernent toute onde



3. QUAND LE FAISCEAU LUMINEUX issu d'une étoile et dirigé vers l'œil de l'observateur rencontre un petit volume d'atmosphère (en bleu foncé dans le zoom) dont l'indice optique de réfraction diffère de la valeur moyenne, il peut diverger (comme représenté ici) ou converger. Cela modifie l'intensité de la lumière transmise. L'accumulation de ces phénomènes le long du faisceau conduit à des fluctuations d'intensité lumineuse : c'est le scintillement. Pour une planète, la lumière forme un faisceau conique dont la section (de l'ordre de un mètre de diamètre à dix kilomètres de l'œil) est bien plus grande que les hétérogénéités atmosphériques responsables du scintillement. Par un effet de moyenne, le scintillement devient négligeable.

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

P. M. Kintner *et al.*, GNSS and ionospheric scintillation, How to survive the next solar maximum, *InsideGNSS*, pp. 22-30, juillet-août 2009 (<http://www.insidegnss.com/auto/julyaug09-kintner.pdf>).

D. K. Lynch et W. Livingston, Aurores, mirages, éclipses..., Dunod, 2002.

D. Dainis *et al.*, Atmospheric intensity scintillation of stars, I. Statistical distributions and temporal properties, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 109, pp. 173-207, 1997.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

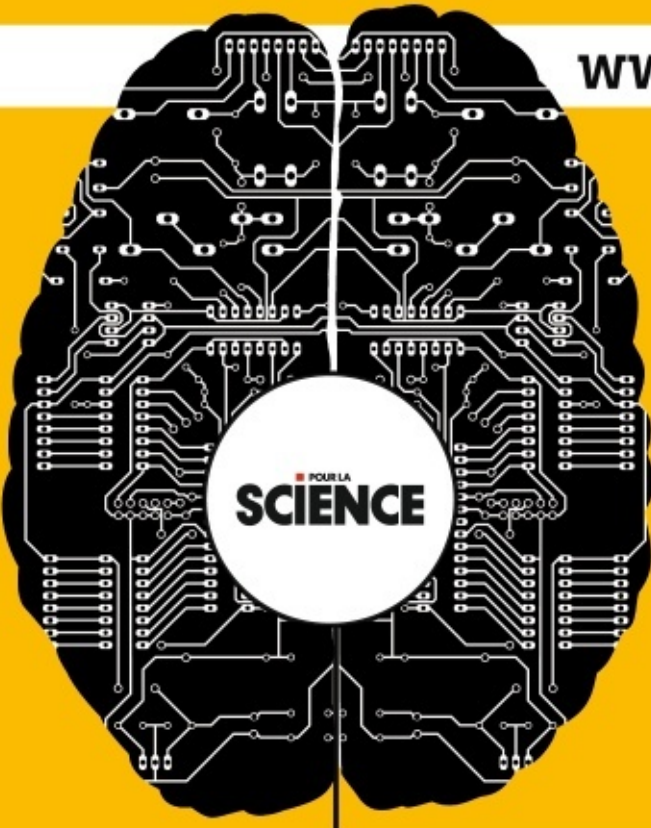
qui traverse un milieu non homogène. C'est le cas des signaux émis par les satellites dans le domaine des micro-ondes lorsqu'ils traversent l'ionosphère. Cette couche de l'atmosphère fortement ionisée altère la vitesse de propagation de ces ondes, effet qui doit être pris en compte dans le traitement des signaux du système GPS de géolocalisation.

Orages solaires contre GPS

Lors des orages solaires, l'ionosphère est fortement perturbée. Comme la longueur d'onde des micro-ondes est beaucoup plus grande que celle de la lumière visible, aux effets de lentille s'ajoutent des effets de diffraction. Le rôle des irrégularités atmosphériques dont la taille est de quelques

centaines de mètres est alors important. En outre, lorsqu'elles sont nombreuses, des interférences ont lieu entre les ondes diffrusées par plusieurs perturbations. Il en résulte au niveau du sol un éclairage non homogène, semblable à l'aspect granuleux d'une surface éclairée par un faisceau laser, mais avec une granularité de taille caractéristique bien plus grande.

Pour l'utilisateur, cela se traduit par des interruptions de signal imprévisibles. Lors du prochain maximum de taches solaires, prévu pour mai 2013, seules des perturbations mineures sont à attendre sur les récepteurs courants, assez peu sensibles. En revanche, pour les applications nécessitant une grande sensibilité ou un suivi ininterrompu du signal, il sera nécessaire d'adapter les algorithmes de traitement du signal...



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>

SCIENCE & GASTRONOMIE

Le temps des cerises

Comment simultanément conserver des cerises et soigner un mal de crâne.

Hervé THIS



Les délicieuses cerises se conservent mal. Elles perdent du poids, de l'acidité, de la couleur, de la fermeté. Comment retarder leur détérioration sans recourir à des moyens que les consommateurs refusent ? Comment éviter le pourrissement dû à des micro-organismes, sans antibiotiques ou rayonnements gamma, pourtant efficaces ?

Nous voudrions des moyens dits naturels, oubliant que rien, dans la cuisine, ne l'est : l'activité culinaire est littéralement artificielle, et c'est parce que nous cuisinons que nous évitons d'être empoisonnés par les micro-organismes ; c'est parce que le cuisinier met la main à la pâte que les mets sont bons. C'est parce que nous ne sommes plus dans un état de nature que nous vivons plus longtemps et mieux que nos aïeux.

Revenons à nos cerises. Les fruits, pour parvenir à ceux qui vivent loin des arbres, doivent subsister pendant la durée de la récolte, la durée de l'acheminement vers les villes, les durées du stockage sur l'étal de l'épicier et à domicile.

Les chimistes ont cherché, dans les fruits, des composés « naturels » qui allongeraient la durée de stockage. Ils ont identifié que l'acide salicylique, l'acide acétylsalicylique ou l'acide oxalique retardent le mûrissement de la banane, du kiwi, de la mangue, de la pêche. De surcroît, l'acide oxalique évite le brunissement du litchi et retarde le mûrissement de certains fruits tels la mangue, la pêche, etc., en inhibant la biosynthèse de l'éthylène, une hormone végétale de maturation.

Tout récemment, des chimistes de l'Université d'Alicante ont testé l'effet de ces acides sur le mûrissement des cerises et mis au point des traitements qui retardent

la maturation après récolte et évitent la perte d'acidité, les changements de couleur, les pertes de fermeté.

« La méditation est si douce et l'expérience si fatigante que je ne suis point étonné que celui qui pense soit rarement celui qui expérimente », disait Denis Diderot. Nos chimistes espagnols, eux, se sont retroussé les manches, ont testé deux cultivars, récoltant des milliers de fruits à de nombreux stades de maturation, mesurant leur couleur et leur taille. Juste après la récolte, les fruits étaient plongés pendant dix minutes soit dans de l'eau distillée [témoin], soit dans des solutions concentrées respectivement en acides salicylique, acétylsalicylique, oxalique. Puis les fruits étaient égouttés et stockés, après séchage, à la température de 2 °C, dans l'obscurité. Après 5, 10, 15 et 20 jours, les cerises étaient analysées : couleur, fermeté, activité antioxydante totale, teneur en pigments.

Les diminutions de couleur, fermeté et acidité totale étaient notablement retardées pour les fruits traités par les trois acides : les valeurs observées après 20 jours de stockage étaient identiques à celles qui avaient été mesurées pour les cerises non traitées après dix jours de stockage seulement.

Les chimistes espagnols insistent sur les faibles pertes de composés antioxydants des fruits traités, comme il se doit en ces temps bien-pensants où l'expression « alimentation santé » est de rigueur ; toutefois, pourquoi ne donnent-ils aucune indication sur la teneur éventuellement accrue en acides oxalique, salicylique ou acétylsalicylique ? L'origine « naturelle » de ces acides suffirait-elle à légitimer leur présence ? Et si l'on avait annoncé un traitement à l'acide 2-hydroxybenzoïque ou à l'acide 2-(acétyloxy)ben-

zoïque ? Le public se serait sans doute effrayé... alors qu'il s'agit des mêmes composés, le second étant plus connu sous le nom d'aspirine. Et l'acide oxalique ? On le trouve à l'état naturel dans les racines et rhizome de nombreuses plantes telles que l'oseille, la rhubarbe..., mais supporterions-nous d'utiliser celui, en tout point identique, qui proviendrait de l'oxydation du saccharose par l'acide nitrique ? Sans doute pas.

Décidément, l'éternelle question de la nature n'est pas résolue, malgré les pages clairvoyantes du philosophe John Stuart Mill, qui disait très justement que la nature nous tue une fois par vie. Après lui, il faut rappeler vigoureusement que si nous nous vêtions, si nous nous logeons, si nous cuisinons des aliments, c'est pour nous protéger de la nature, du soleil, des frimas, des micro-organismes pathogènes... La chimie, science des réarrangements d'atomes, n'a pas fini de trouver ses applications dans le moindre des mets que nous consommons.

Pour éviter le pourrissement des fruits, utilisons les acides oxalique, salicylique, acétylsalicylique, non parce qu'ils sont naturels, mais parce qu'ils sont efficaces ; ils soigneront en même temps un éventuel mal de crâne engendré par les gesticulations pseudo-écologiques des ignorants de la chimie. ■



Hervé THIS est professeur à AgroParisTech, chercheur à l'INRA (Groupe de gastronomie moléculaire) et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé THIS sur www.pourlascience.fr

→ ENVIRONNEMENT

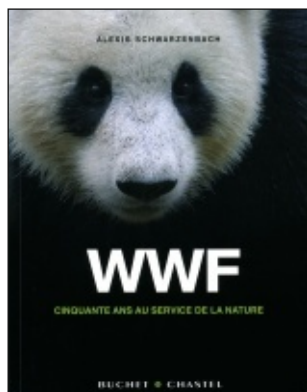
WWF

Alexis Schwarzenbach

Buchet Chastel, 2011
[350 pages, 29 euros].

A l'occasion de son cinquante-
naire, Alexis Schwarzenbach
retrace ici magistralement
l'histoire du Fonds mondial pour
la nature ou, depuis 2001, WWF,
l'une des organisations non gou-
vernementales et environnemen-
tales les plus célèbres. Créé en 1961,
le WWF se distingue profondément
des mouvements qui l'ont précédé,
car son but initial était avant
tout de rassembler l'argent néces-
saire au financement de projets
environnementaux menés par
d'autres structures, en particulier
par l'Union internationale pour
la conservation de la nature (UICN),
une organisation internationale
fondée en 1948 et sans cesse au
bord de la faillite.

Les créateurs du WWF étaient
particulièrement inquiets de l'état



de l'environnement naturel en
Afrique, car la décolonisation me-
naçait les parcs et les réserves, et
ruinait les efforts entrepris dans la
lutte contre le braconnage. Le choix
du sigle, du nom, du logo comme
du pays du siège social, tout
est conçu pour en faire une orga-
nisation moderne, capable d'utili-
ser des outils de communication

similaires à ceux des grandes
marques commerciales. On re-
cherche aussi l'argent là où il
est : les grandes fortunes, qu'elles
appartiennent au monde des af-
faires ou de l'aristocratie, sont sol-
licitées et certaines deviennent des
figures emblématiques de l'orga-
nisation comme le prince Philip,
duc d'Édimbourg, le prince Bern-
hard des Pays-Bas ou Luc Hoff-
mann, héritier des Laboratoires
Hoffmann-Laroche.

Cette collusion très forte avec
les puissants a influé sur les choix
pris par le WWF et explique par-
fois ses errances. Ainsi, l'organi-
sation a rarement critiqué l'indus-
trie du nucléaire (même si certaines
branches nationales l'ont fait com-
me le WWF-Suisse) ou celle du pé-
trole (la Société BP fut longtemps
l'un de ses principaux sponsors).
Pire, on a soupçonné le WWF d'avoir
été impliqué dans de sombres his-
toires de barbouzes en Afrique du
Sud. Il n'en reste pas moins que cet-
te démarche a dégagé des sommes
importantes permettant au WWF de
devenir un indispensable acteur de
la conservation de l'environnement
et de ses ressources.

Se fondant sur des sources ori-
ginales très riches, l'auteur nous
livre non une hagiographie de l'or-
ganisation en dressant la simple
liste de ses nombreuses activités,
mais une analyse précise et détaillée
du fonctionnement interne de l'orga-
nisation, des luttes entre
ses membres et des difficultés
d'entente entre les différentes
entités nationales. Il faut souligner
la pertinence du choix iconogra-
phique, qui permet de découvrir
les images utilisées dans les dif-
férentes campagnes de commu-
nication, l'évolution du logo ou la
variété des produits proposés.

→ Valérie Chansigaud

Historienne des sciences
de l'environnement

→ COSMOLOGIE

**L'Univers
imparfait**

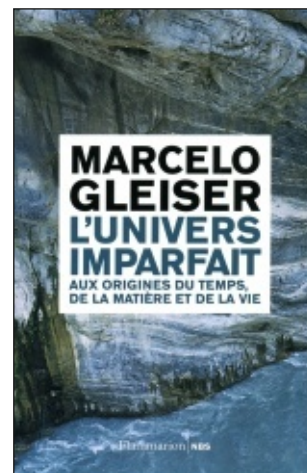
Marcelo Gleiser

Flammarion, 2011
[416 pages, 24 euros].

Le rêve d'une théorie ulti-
me décrivant à elle seule
toutes les interactions fon-
damentales est-il un objectif légi-
time et réaliste ? Dans cet ouvrage,
Marcelo Gleiser nous explique
sa conviction que la réponse à cette
question est non. Non, dit-il, la
théorie du tout, sur laquelle plan-
chent pourtant tant de physiciens,
ne sera jamais connue. Ce n'est
qu'une chimère, une illusion
d'harmonie que les scientifiques
poursuivent à tort... influencés
qu'ils sont par les préceptes des
grandes religions monothéistes.

La thèse a de quoi surprendre,
et tout le monde ne sera pas
convaincu par l'approche de l'au-
teur. Mais ce faisant, il effectue un
intéressant survol de quelques-
unes des grandes questions de
la physique et de l'astrophysique
modernes, telles la dissymétrie
matière-antimatière ou l'appari-
tion de la vie, le tout dans un
discours où science et histoire des
sciences se mêlent à son histoire
personnelle.

M. Gleiser navigue ainsi entre
l'exposé scientifique classique et
l'autobiographie, une particula-
rité qui est aussi la principale fai-
blesse de son livre. Car tout aussi
intéressant que soit son propos, ce-
lui-ci n'est pas exempt de subjec-
tivité. Par exemple, dans la der-
nière partie, consacrée au princi-
pe anthropique, est évoquée une
question récurrente : l'Univers
favorise-t-il de façon mystérieuse
l'apparition de la vie ou, au contrai-
re, celle-ci ne s'épanouit-elle qu'en
de très rares endroits, et ce, mal-
gré un milieu hautement hostile ?



Arguments à l'appui, M. Gleiser
choisit la seconde option et affir-
me que la vie est rarissime dans
l'Univers et que l'espoir d'entrer
en contact avec une civilisation ex-
traterrestre est vain.

Les arguments de l'auteur
sont intéressants, mais il ne don-
ne guère la parole à ses détract-
eurs, à qui il décerne quelques
bons et beaucoup de mauvais
points. Nul doute que cette partie
aurait été bien plus intéressante si
elle avait été bâtie sous la forme
d'un vrai dialogue entre l'auteur
et d'autres scientifiques. Et c'est
sans doute là le principal reproche
que l'on peut faire à cet ouvrage,
par ailleurs plutôt bien écrit et
agréable à lire : un point de vue un
peu trop personnel que le lecteur
non averti pourrait prendre pour
l'expression d'une pensée domi-
nante, alors qu'il n'en est rien.

Au final, l'ouvrage est un peu
trop atypique pour qu'on le re-
commande sans réserve au lecteur
néophyte. L'amateur plus éclairé
y appréciera en revanche ce regard
quelque peu décalé et doté d'une
riche bibliographie qui permettra
aux plus curieux d'aller plus loin.

→ Alain Riazuelo

Institut d'Astrophysique
de Paris

→ CLIMATOLOGIE

L'océan, le climat et nousSous la direction
de Édouard BardLe Pommier, 2011
(192 pages, 35 euros).

En France, le changement climatique est dans l'air du temps ! Il est à l'origine de nombreuses discussions, polémiques et controverses... Le climat de la planète est-il en train de changer ? Quelles en sont les causes, quelles en seront les conséquences pour l'humanité ?... Au-delà des discours et de maints ouvrages stériles ou partisans, le très bel ouvrage réalisé sous la direction d'Édouard Bard entouré de cinq chercheurs de renommée internationale permet d'appréhender clairement les faits sur la base de mesures et de données scientifiques établies.

L'ouvrage se compose de cinq parties, chacune d'une trentaine de pages, qui traitent de l'océan mondial (généralités), de l'océan exploré (nos connaissances actuelles), du réchauffement de la Terre et de l'élévation du niveau marin, du rôle fondamental de la vie marine et, enfin, de l'impact des hommes. Chacun de ces chapitres dresse un bilan objectif des décennies passées et propose une évaluation cadrée de l'évolution de la situation dans le futur proche.

Chaque chapitre est étayé par des données résultant d'innombrables mesures (dans les océans par exemple), ou de très nombreuses observations biologiques. Les échanges entre l'océan et l'atmosphère sont analysés en détail ; le réchauffement de l'atmosphère provoque une dilatation de la masse d'eau océanique à laquelle s'ajoute la fonte des glaces, qu'il s'agisse des glaciers

continentaux ou des inlandsis, d'où une élévation inéluctable du niveau marin... Plus inquiétante est l'acidification du milieu marin qui affecte tous les organismes sécrétant coquille et carapace, notamment tous ceux qui



constituent le zooplancton et sont à la base de la chaîne trophique marine... Il convient d'y ajouter l'exploitation démesurée des ressources halieutiques, et le comportement anthropique, dont la pisciculture... Le dioxyde de carbone, s'il n'est pas le seul agent « actif » dans la dérive et la dérégulation des systèmes naturels, résulte en grande partie de l'activité des sociétés humaines, et donc des orientations et des choix politiques. Sachant que la nature met des siècles, voire des millénaires, à éliminer les effets des agressions qu'elle subit pour retrouver ses systèmes naturels de régulation, il est grand temps de changer nos comportements...

L'iconographie est d'excellente qualité et illustre parfaitement le texte, avec des photos saisissantes qui interpellent parfois la raison humaine et le bon sens... La seule remarque que l'on puisse faire concerne une ou deux figures difficilement lisibles du fait de couleurs peu appropriées.

Je recommande vivement cet ouvrage à tous les curieux que l'état de notre planète intéresse.

L'espèce humaine a accaparé la planète Terre, à la fois par sa prolifération et par ses comportements sociétaux, au grand détriment des équilibres naturels qui en ont fait la richesse !

→ Patrick Racheboeuf
CNRS, Brest

→ HISTOIRE DES SCIENCES

Buffon, le sacre de la nature

Gilbert Joseph

Perrin, 2011
(450 pages, 27 euros).

Georges Louis Leclerc (1707-1788), devenu comte de Buffon, est si fortement associé à l'histoire naturelle que jusqu'au XX^e siècle, on a publié sous le simple titre de « Buffon » des ouvrages sur ce sujet, qui parfois n'étaient que de loin inspirés de son œuvre.

Cette biographie très fournie nous révèle pourtant un personnage fort éloigné de l'image, née au XIX^e siècle, que l'on se fait généralement du naturaliste. On le voit volontiers comme un homme de terrain passant une grande partie de son temps au contact



Brèves

LE CLIMAT À DÉCOUVERTCatherine Jeandel
et Rémy Mosseri (dir.)
CNRS Éditions, 2011
(288 pages, 39 euros).

Au fil de 85 chapitres de deux à quatre pages écrits par des spécialistes dans un style clair et didactique, cet ouvrage fournit tous les éléments pour comprendre les recherches actuelles sur le climat, de la physique de l'atmosphère et des océans aux données mesurées et aux modélisations associées, en passant par l'estimation des perturbations et les enjeux de ces études. Une mine d'informations sur les outils et techniques mis en œuvre dans l'étude du climat.

**LA VILLE DURABLE, DU POLITIQUE AU SCIENTIFIQUE**Nicole Mathieu
et Yves Guermond (éd.)

Quæ, 2011 (286 pages, 35 euros).

Qu'est-ce que la ville durable ? Peut-on la mettre en pratique ? Les points de vue politique et scientifique sont-ils conciliables ? C'est à cette réflexion que nous invitent 33 urbanistes, économistes, sociologues, écologues, climatologues et géographes, qui n'hésitent à pointer ni les difficultés ni les contradictions entre leurs vues.

1000 CASSE-TÊTE ET ÉNIGMESPierre Berloquin
Flammarion, 2011
(752 pages, 19,90 euros).

Vous voulez vous creuser les méninges cet été ? Ce livre est pour vous : classés par thèmes — concentration, logique, imagination, lettres, mémoire, chiffres — 1 000 petits jeux mathématiques, littéraires ou d'observation sont proposés dans une mise en page aérée et colorée.

Brèves



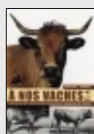
IL ÉTAIT UNE FOIS LA PALÉOANTHROPOLOGIE

Pascal Picq
Odile Jacob, 2011
(301 pages, 21,90 euros).

La paléontologie a beaucoup progressé en 30 ans, ce que nous conte l'auteur de façon vivante. Puis il en tire un miel personnel quant aux implications de ces avancées pour les relations entre cette science et sa voisine la préhistoire, mais aussi en ce qui concerne notre santé et l'éthique de nos rapports aux animaux. Passionnant.

A NOS VACHES

Philippe Dubois
Delachaux&Niestlé, 2011
(96 pages, 14 euros).



La culture rurale, si importante pourtant, par exemple en agronomie, n'a que rarement droit de cité. L'auteur commente avec pertinence la remarquable collection d'images de vaches qu'il a rassemblée avec passion. Il fixe ainsi le statut actuel en France de plus d'une soixantaine de variétés de vaches, révélant notamment que chez les vaches domestiques aussi, la biodiversité chute !



L'ARCHÉOLOGIE DU JUDAÏSME

P. Salmona et L. Sigal (dir.)
La Découverte, 2011
(358 pages, 25 euros).

Petit à petit, les découvertes de juiveries (quartiers juifs), de synagogues, d'écoles talmudiques, de cimetières, de latrines... s'accumulent et une archéologie du judaïsme européen depuis les Romains se dessine. En France, elle est d'autant plus nécessaire qu'on tend à oublier que ce pays a chassé sa minorité juive aux XIII^e et XIV^e siècles, 100 ans avant l'Espagne. Les données contenues dans ce livre contribuent à restituer les vies et la culture, jusque-là négligées, de ces anciens Européens.

direct des animaux, des plantes ou des roches. Buffon, lui, est un « savant de cabinet », qui a commencé par s'intéresser aux mathématiques, qui a peu voyagé, et dont la grande œuvre, *l'Histoire naturelle générale et particulière*, est très largement une compilation des écrits d'autrui.

Ennemi des classifications, et notamment de celle de Linné, en qui il voit un rival, il se complait dans les descriptions, rédigées dans le style majestueux qui a fait sa gloire. En dépit des critiques de certains de ses contemporains, ses écrits ont eu un succès énorme, en ce « Siècle des Lumières » qui se piquait d'une nouvelle vision du monde.

Il est vrai que lorsqu'il se lance dans la spéculation intellectuelle, Buffon fait souvent œuvre originale. Il n'hésite pas à braver les dogmes religieux, comme lorsqu'il entreprend de reconstituer la longue histoire de la Terre sans se préoccuper du récit de la Genèse. Il est nettement moins précurseur lorsqu'il traite de biologie, attaché qu'il est à l'idée de génération spontanée.

Gilbert Joseph retrace avec talent la carrière de cet homme si représentatif de son temps, qui navigue avec aisance dans les hautes sphères de la société de l'Ancien Régime et accumule les succès, notamment lorsqu'il devient intendant du Jardin du roi (devenu Muséum d'histoire naturelle à la Révolution).

On découvre un Buffon ambitieux, ne reculant pas devant les intrigues pour faire aboutir ses projets professionnels et financiers, et menant grande vie aussi bien à Paris que sur ses terres de Montbard, en Bourgogne, où il combine la rédaction de ses œuvres et ses activités de propriétaire terrien et de maître de forges. Sa vie privée n'est pas dé-

pourvue d'aventures galantes, bien à l'image des mœurs du XVIII^e siècle. En allant au-delà de l'œuvre pour nous révéler l'homme que fut Buffon, ce livre nous permet de mesurer non seulement combien les connaissances ont évolué, mais aussi à quel point la façon dont on « fait de la science » a changé depuis Buffon.

→ **Eric Buffetaut**

CNRS, Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure, Paris

→ ARCHÉOLOGIE

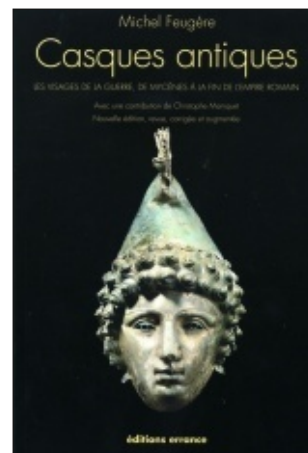
Casques antiques

Michel Feugère
Errance, 2011
(190 pages, 32 euros).

Sans doute apparu en Grèce peu avant le I^{er} millénaire avant notre ère, le casque métallique est depuis cette époque un élément essentiel de la panoplie guerrière. Il s'agit ici de l'étudier pendant l'Antiquité, lorsque cette arme défensive non seulement protégeait le soldat, mais le représentait aussi.

Cette nouvelle édition d'un livre publié pour la première fois en 1994 est intéressante, car l'auteur a pris en compte les débats suscités par le casque depuis la parution de son ouvrage et a inclus les dernières grandes découvertes, notamment l'étonnant casque gaulois en forme de cygne de Tintignac, en Corrèze, et le magnifique casque argenté de cavalier romain de Crossby Garrett, en Grande-Bretagne.

L'ouvrage part des modèles grecs de l'époque archaïque, passe par les Gaulois et finit par les



Romains auxquels il accorde une place de choix. L'une de ses principales caractéristiques tient à l'abondance de l'iconographie, qui permet de bien suivre l'évolution du casque.

Le casque était un élément essentiel de l'armement défensif, le seul même que possédaient les soldats les plus pauvres. Surmonté d'un panache chez les Romains, souvent oublié car il a disparu, il donnait aux ennemis encore lointains l'impression que s'avançaient vers eux des géants ; les Anciens n'ignoraient pas la guerre psychologique !

Par ailleurs, le luxe de la décoration permettait au porteur du casque de marquer au combat sa place dans la société militaire et, quand il défilait en présence de civils, dans la société tout court. C'est assez dire que cet ouvrage intéressera les passionnés de la chose militaire, comme tous les curieux de l'histoire romaine.

→ **Yann Le Bohec**

Professeur d'histoire romaine à l'Université Paris IV-Sorbonne



Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur :
www.pourlascience.fr