



POUR LA

SCIENCE

Février 2013 - n° 424

www.pourlasience.fr

Édition française de Scientific American

L'INFORMATION

Vers une théorie universelle ?

**Le langage
des neurones**

Des échanges rythmés

**Le magnétisme
de la Lune**

Comment notre satellite
s'est-il aimanté ?

Mammouth laineux

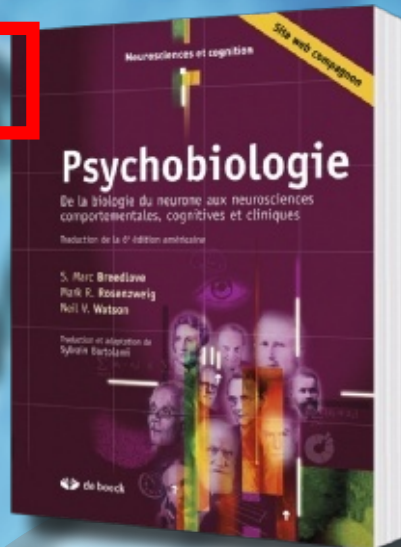
Ses gènes ont parlé



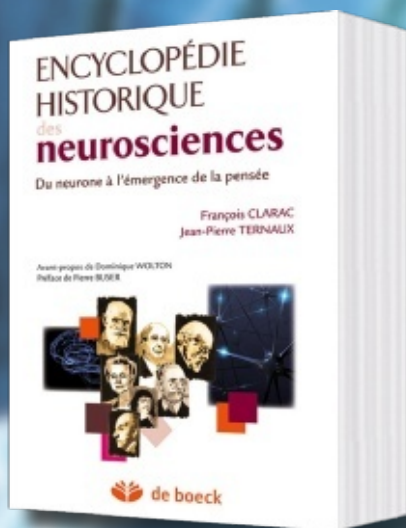
M 0267-424 - F: 6,20 €

Une introduction
aux **NEUROSCIENCES
COMPORTEMENTALES**

Breedlove • Rosenzweig • Watson
760 pages • 60 €



Approchons-nous des
LIMITES DE LA SCIENCE ?

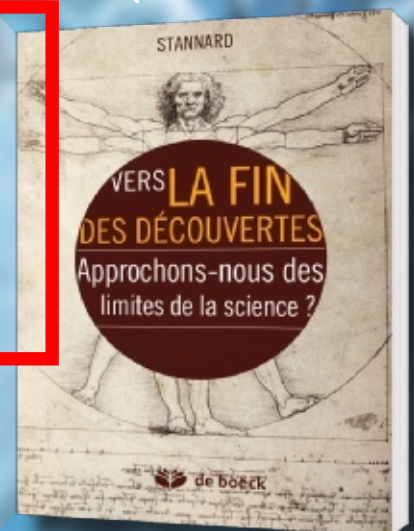


Clarac • Ternaux
1042 pages • 75 €

Du neurone à **L'ÉMERGENCE
DE LA PENSÉE**



Thomas • Lefèvre • Raymond
840 pages • 90 €



Stannard • 323 pages • 19 €

Tous les concepts
de la biologie évolutive
LA référence

POUR LA SCIENCE

www.pourlasience.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, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly

Dossiers Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteur : Sébastien Bohler

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice : Bénédicte Salthun-Lassalle

Directrice artistique : Céline Lapert

Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenet,
Sylvie Sobelmann, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Yoan Bassinet

Marketing : Élie Abib

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Marc Launet

Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de publication et Gérante : Sylvie Marcé

Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This

Ont également participé à ce numéro : François Chausson,
Antoine Dancou, Thierry Delcroix, Brice Felden, Sophie
Gallé-Soas, Constance Hammond, Evelyne Host-Platret,
Christophe Pichon, Sean Raymond, Jean-Paul Richalet

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(jf.guillotin@pourlasience.fr)

Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Fax : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Boufflé. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

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

Adresse e-mail : abonnements@pourlasience.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

Contact kiosques : À juste titres ; Benjamin Boutonnet

Tel. : 04 88 15 12 41

Canada : Edipresse

Québec, H3N 1V3 Canada.

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

Belgique : La Cavelle, 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 Mayer, 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.

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).



Information ou communication ?

En 1948, l'Américain Claude Shannon publie l'article *A Mathematical theory of communication*. Cette « théorie mathématique de la communication » a changé d'identité au fil du temps, puisqu'en français elle est connue sous le nom de théorie de l'information. Shannon avait élaboré son modèle pour résoudre un problème de communication téléphonique (augmenter la vitesse de transmission des données et en diminuer les pertes). Dans ce modèle, la communication est définie en termes de transmission d'information, quelle qu'elle soit (voir *La théorie de l'information existe-t-elle ?*, page 18).

Aussi s'est-on tenté d'appliquer cette théorie – avec plus ou moins de succès – à divers domaines, par exemple le langage. Serait-ce envisageable pour le langage des neurones ? On découvre que les neurones établissent un dialogue porteur de sens en utilisant des informations temporelles : des assemblées de neurones qui émettent un signal de façon synchrone transmettent plus efficacement une information que des populations désynchronisées (voir *Le langage des neurones*, page 50).

Les deux notions se confondent.

Pourrait-on appliquer la théorie de l'information à l'étude des gènes de mammouths préservés dans les glaces, étude dont on déduit que ces animaux disparus avaient un pelage clair et un métabolisme adapté au froid (voir *Une nouvelle vie pour l'ADN ancien*, page 26) ? Ou aux roches lunaires qui ont « mémorisé » la présence du champ magnétique auquel elles ont été exposées par le passé (voir *Le magnétisme de la Lune*, page 34) ?

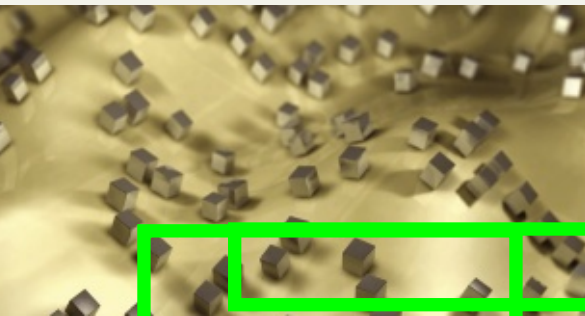
L'information est omniprésente. Elle est envahissante. Elle perd parfois son sens quand son déferlement dépasse les capacités de l'esprit humain à trier le bon grain de l'ivraie numérique (malgré l'efficacité du langage des neurones !). Sans validation, sans recul, sans hiérarchisation, l'information devient communication, une transmission de données brutes. Alors, les deux notions se confondent. Un nouvel exemple de la dérive de sens déjà présente dans la tradition du titre de l'article de Shannon ?

1 **LE TO**4 **BLOC-NOTES***Didier Nardon*

Actualités

6 Un disque de galaxies
raies autour d'Andromède

8 L'art de couper net

10 Absorber la lumière
avec des nanocubes12 Résistance des bactéries :
un nouveau mécanisme
... et bien d'autres sujets

Opinions

14 **POINT DE VUE**
Dérembourser
les contraceptifs oraux
de 3^e génération :
une aberration*Israël Nisand*15 **DÉVELOPPEMENT DURABLE**
La diversité génétique,
au cœur des politiques
de préservation*Pierre Taverlet*17 **VRAI OU FAUX**Bronze-t-on derrière
une vitre ?*Évelyne Sage*

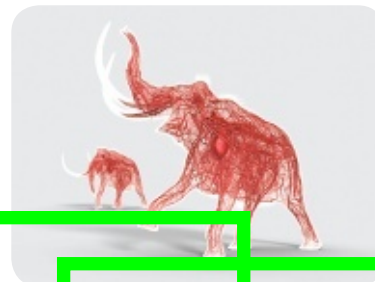
Ce numéro comporte deux encarts
d'abonnement : un sur la totalité du tirage.
En couverture Pour la science

18 **ÉPISTÉMOLOGIE**
La théorie de l'information
existe-t-elle ?*Jérôme Segal*

Quantifier l'information
et en faire un concept
scientifique précis :
cet objectif de la théorie
de l'information, qui a
65 ans, reste d'actualité.

26 **PALÉONTOLOGIE**
Une nouvelle vie
pour l'ADN ancien*Kevin Campbell et Michael Hofreiter*

Les scientifiques résolvent des énigmes
physiologiques de la paléontologie en reconstituant,
à partir de fragments d'ADN, des protéines d'espèces
disparues, tel le mammouth.

34 **PLANÉTOLOGIE**
Le magnétisme de la Lune*D. Cébron, M. Le Bars et M. Wiczeorek*

Les échantillons de roches lunaires rapportés par
les missions Apollo indiquent que la Lune présente,
dans le passé, un champ magnétique global.
Son origine semble très différente de celle
du champ magnétique terrestre.

42 **ENVIRONNEMENT**
La lutte biologique,
stratégie durable*Paul-Arthur Calatayud*

La lutte biologique consiste à réguler les populations
d'organismes nuisibles aux cultures ou à la santé
à l'aide d'autres organismes. Depuis quelques
années, elle connaît un essor important.

50 NEUROLOGIE Le langage des neurones

Terry Sejnowski et Tobi Delbruck

La communication cérébrale repose sur une chronologie précise des signaux électriques transmis d'un neurone à l'autre.



56 ARCHÉOLOGIE Du nouveau au royaume de Crésus

Oliver Hübner

La Lydie, le pays où coule le Pactole, était un riche royaume antique, qui reste mal connu. Après plus d'un siècle de fouilles dans sa capitale, les archéologues viennent d'étendre leurs recherches à la province lydienne.

62 CLIMATOLOGIE Des hivers plus rigoureux ?

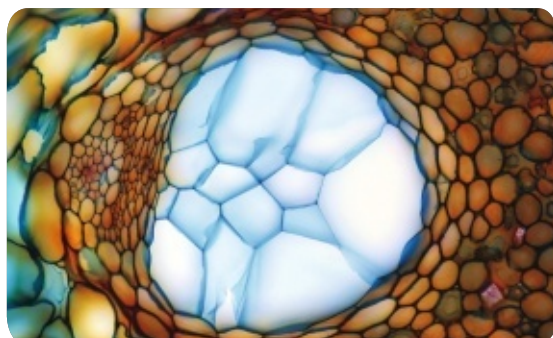
Charles Greene

Le recul de la banquise en Arctique perturbe la dynamique atmosphérique et serait responsable d'hivers plus rigoureux aux États-Unis et en Europe.

70 IMAGERIE Petites merveilles

Kate Wong

La microscopie optique révèle des splendeurs cachées de la nature. Les images du concours 2012 d'Olympus le prouvent une fois de plus.



Regards

76 HISTOIRE DES SCIENCES

La définition de la mort

Isabelle Lhu

Comment être certain de ne pas inhumer un individu encore vivant ? Au XIX^e siècle, cette question était au cœur des réflexions des médecins légistes.

80 LOGIQUE & CALCUL

Le problème de la fabrique de briques

Jean-Paul Delahaye

En poussant des chariots de briques ou en dessinant des circuits électroniques, on est confronté au difficile problème du nombre de croisements dans un graphe.

86 SCIENCE & FICTION

Pour quelques pattes de plus...

J.-S. Steyer et R. Lehoucq

88 ART & SCIENCE

Ornam : de la grue aux structures de l'Univers

Loïc Marguin

90 IDÉES DE PHYSIQUE

Les frottements classés X

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik

93 SCIENCE & GASTRONOMIE

Les odeurs blanches

Hervé This

94 À LIRE

SCIENCE

Pour une étude de lectorat, nous recherchons des lecteurs non abonnés, réguliers ou occasionnels.

La réunion aura lieu à Paris en février 2013.*

Si vous êtes intéressé(e), merci de contacter avant le 13 février 2013 Wassim Hamdani par courriel : whamdani@qualeia.com ou par téléphone 01 44 82 72 39.

* Réunion informelle réalisée par un institut d'études indépendantes, et organisée en fin de journée.

→ SANS FOI NI LOI... MATHÉMATIQUE

Les mathématiques, artifice de certitudes en un monde incertain ? Écoutons plutôt Pierre Cartier, Jean Dhombres, Gerhard Heinzmann et Cédric Villani dans une conversation publiée sous le titre *Mathématiques en liberté* (Éditions La Ville Brûlée, 2012).

« Les débats sur les fondements des mathématiques ne sont pas bouclés, et la cohérence interne n'a jamais été établie – le sera-t-elle un jour ? À mon échelle personnelle, l'un des combats que j'ai menés était de supprimer toutes les occurrences de l'axiome du choix », déclare Cédric Villani. Selon Pierre Cartier, ce même axiome inspire à Pierre Deligne (médaille Fields 1978) une toute autre attitude : « Deligne dit qu'évidemment il se sert de l'axiome du choix par convenance [comprendre : commodité], mais qu'il n'y croit pas. » Les mathématiciens peuvent donc pratiquer sans avoir la foi... Dans leurs rapports avec la logique, ils ne savent où donner de la tête. Pierre Cartier juge « logiquement irresponsable » la façon dont ils utilisent la théorie des catégories. Cependant, quand leur démarche est correcte, ils se font dire par Cédric Villani (au sujet des très grands cardinaux) : « Logiquement, cela tient debout, mais c'est contestable. » Enfin, le lecteur apprend que la classification des groupes finis simples a de quoi laisser dubitatif : « Il a quand même fallu récemment rajouter 800 pages à la démonstration

qui en avait déjà 10 000 parce qu'on avait oublié un cas particulier ! » Que nul n'entre en mathématiques s'il n'aime à peu près !

manœuvre subtile, née d'un souci de propagande : par nature, la pédagogie est au service de ce bien qu'est la transmission du savoir, non de ce mal qu'est la manipulation des esprits.

Les politiciens ne poussent pas le goût de la pédagogie jusqu'à expliquer qu'il faut se méfier des mots qu'ils utilisent. Cette leçon, il nous revient de la tirer tout seuls.

→ INTELLIGENCE ÉPHÉMÈRE

En fait, la particularité à des humains, les définitions anciennes de l'intelligence excluaient les gens issus de cultures dominées, et cautionnaient le racisme. Les définitions actuelles, fondées sur une conception plus « naturelle » de l'intelligence, incluent une partie du monde animal, voire végétal. Elles sont influencées par l'écologie : hommes, bêtes, plantes, planète, ont partie liée. Qu'elles soient plus estimables que les précédentes ne leur évitera sans doute pas de paraître un jour, elles aussi, marquées par des préjugés d'époque.

Un auteur qui définit l'intelligence trace une démarcation entre les êtres dont il se sent proche et ceux dont il se sent éloigné. Il répond, implicitement, à une question : qui s'agit-il d'exclure, qui s'agit-il d'inclure ? Toute une conception du monde est ainsi mise en jeu. Définir l'intelligence s'inscrit dans ces batailles idéologiques pour lesquelles nous avons un goût immémorial.



→ À L'INDÉCISION

« L'originalité de l'homme, depuis le début, "p'têt ben qu'je chache, p'têt ben qu'je broute". En refusant la décision caricaturale, sans pour autant tomber en syndrome d'inhibition de l'action, [...] ils gardèrent, en tout temps, de prodigieuses facultés d'adaptation. » Le Normand est « au sommet de la hiérarchie des primates » grâce à sa « méfiance systématique doublée d'une ouverture de principe à l'innovation, si bien résumées par la devise nationale "pt'êt ben qu'oui, pt'êt ben qu'non" » André Langaney, *Ainsi va la vie*, Éditions Sang de la Terre, 2012).

De suite de ces lignes que leur auteur doit être normand, ce serait le suspecter de préjugés régionalistes : écartons ce soupçon insignifiant. D'autant qu'il suffit de regarder pour constater que, en effet, la rigidité des gens trop sûrs des voies qu'ils proposent ne cesse de causer des dégâts.

Installer dans les ordinateurs des programmes d'aide à la décision était donc le contraire de ce qu'il fallait faire. Pour un

→ DÉFAUT DE PÉDAGOGIE

Enseigner et gouverner sont des exercices fort dissemblables. Un enseignant se trouve en général face à des jeunes ; mais ils ont envie d'apprendre, plus il doit être pédagogue pour les mener à la faire quand même. Rien de tel pour un gouvernant. Ceux qu'il dirige ne demandent qu'à savoir ce qu'il se garde bien de révéler.

Pourtant, les gouvernants déclarent à l'envi que, si telle mesure est rejetée par l'opinion, c'est qu'ils ont manqué de pédagogie. L'emploi de ce dernier mot, déplacé dans le contexte politique, est-il une erreur de leur part ? Sûrement pas ! C'est une



liorer nos facultés d'adaptation, nous devons développer nos aptitudes à l'indécision. Des programmes d'aide à l'hésitation, voilà ce qu'il nous faut !

→ NUANCES DE PARTITIF

L'orsque l'on gère une affaire complexe, commettre une erreur, ou deux, ou trois, est aussi exceptionnel que n'en commettre aucune. En général, on commet non pas « des » erreurs, mais « de l'erreur » : on prend des options qui, répondant mieux à tous aspects de l'affaire qu'à tels autres, ne sont adaptées qu'en partie.

À part dans des procédures codifiées, les erreurs sont diffuses, leurs suites pas toujours manifestes. Mais nos esprits ont été façonnés par l'école, où les erreurs sont des entités circonscrites, qu'on peut dénombrer et dont les conséquences sont nettes (de mon temps : trois points de moins par faute d'orthographe dans une dictée !). En outre, nous espérons apprendre de nos erreurs. Ce désir nous pousse à simplifier : nous réduisons la réalité confuse à une succession de faits distincts, s'engendrant les uns les autres selon des causalités claires, et nous nous convainquons que, si quelque affaire a échoué, c'est parce que nous avons fait tel choix à tel instant, alors qu'il aurait suffi de faire tel autre choix pour qu'elle aboutisse. La prochaine fois, nous saurons nous en souvenir.

Faire précéder le mot « erreur » d'un article partitif serait plus exact. On respire de l'air, on boit de l'eau, et on commet de l'erreur. Ce qui n'empêche pas, parfois, de connaître non pas la réussite, mais de la réussite. ■



Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques
la plus importante collection d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines

Preservation of Plastic Artefacts in Museum Collections
Édité par Bertrand Lavédrine, Alban Fournier et Graham Martin
328 pages, ill. couleur, 50,70 €

This book is not an art picture book although it contains pictures of works of art, and this is not a scientific treatise although it does include chemical formulae! This book is about both art and science and represents a significant milestone in the journey towards understanding the issues associated with plastics in museum collections, and equally importantly, it helps point the way forward for future work.

FRANÇOIS BORDES ET LA PRÉHISTOIRE
Sous la direction de Françoise Delpéch et Jacques Jaubert
232 pages, ill. couleur, 45 €

Voici le premier ouvrage exclusivement consacré à l'œuvre du préhistorien François Bordes (1919-1981). Incontestablement, avec André Leroi-Gourhan, il est l'un des deux grands noms de la discipline pour la seconde moitié du 20^e siècle en France : géologue, préhistorien, auteur de nombreuses fouilles sur des sites prestigieux du Sud-Ouest, initiateur de la taille expérimentale et à l'origine de travaux précurseurs et fondamentaux, notamment du point de vue méthodologique.

Les arpenteurs des confins
Explorateurs de l'intérieur de la Guyane (1720-1860)
Textes réunis et présentés par Francis Dupuy
296 pages, ill. noir et blanc, 40 €

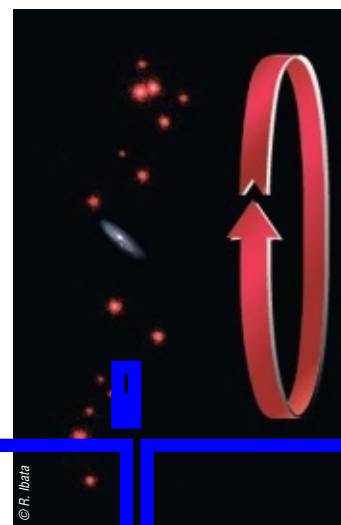
À compter des années 1720, quelques explorateurs intrépides se lancent à l'assaut de l'immensité amazonienne en partant du littoral guyanais. Ils tentent de pénétrer au plus loin, dans l'espoir d'établir une jonction avec le grand fleuve Amazone. Par l'entremise de ces personnages au caractère bien trempé, mêlant l'ambition personnelle et la mission nationale, un continent inconnu des Européens ouvre ses portes, non sans résistance, à l'aventure et au rêve.

* ventes@cths.fr * vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr * Distribution S.O. 30

Astronomie

Un disque de galaxies naines autour d'Andromède

Des observations de la galaxie d'Andromède ont révélé que la plupart de ses satellites sont situés dans un même plan et tournent autour d'elle dans un mouvement d'ensemble.



Deux galaxies satellites (parmi de nombreuses autres) sont visibles sur cette image de la galaxie d'Andromède prise en lumière visible avec le télescope spatial Hubble (*ci-dessus*). La distance et la vitesse radiale de 27 de ces galaxies naines a été mesurée. Parmi elles, 15 (à droite, boules rouges) sont réparties dans un plan, dont 13 tournent ensemble autour d'Andromède (flèche).

Les galaxies naines sont les vestiges des galaxies qui ont fusionné pour donner naissance aux grandes galaxies actuelles, telle la Voie lactée. Contrairement à ce que prédisent les modèles de formation, des observations ont montré que les petites galaxies satellites ne sont pas répartis au hasard autour des galaxies géantes.

Une nouvelle étude réalisée par Rodrigo Ibata, de l'Observatoire de Strasbourg, et ses collègues, renforce cette idée. En analysant les données du relevé PAndAS, effectué entre 2008 et 2011, les chercheurs ont montré que près de la moitié des satellites de la galaxie d'Andromède (ou M31), sont répartis dans un plan et armés d'une rotation d'ensemble autour de leur hôte.

Le recensement détaillé – rendu possible par la proximité d'Andromède, à seulement 2,5 millions d'années-lumière – a révélé 27 galaxies naines compagnons distantes de 100 000 à 1,3 million d'années-lumière de leur hôte. Treize

d'entre elles se situent dans un plan de 2 000 années-lumière d'épaisseur, incliné d'environ 50° par rapport au disque d'Andromède, et ont un profil de vitesse commun, qui trahit une rotation cohérente : les satellites situés au Nord de M31 s'éloignent, tandis que ceux situés au Sud se rapprochent. Trois autres satellites déjà connus se trouvent aussi dans ce plan. Or les 13 satellites découverts dans cette étude sont tous en gaz. C'est la marque des vieux satellites qui devraient avoir des orbites variées !

Par ailleurs, les satellites de la Voie lactée semblent également se trouver dans un plan. Un peu plus loin, 22 des 24 satellites connus de la galaxie Centaurus A sont répartis dans deux plans quasi parallèles. Autour de la galaxie M81, les satellites pauvres en gaz forment un groupe distinct de ceux où se forment des étoiles, et s'étendent à une échelle plus petite.

Dès lors, la découverte de R. Ibata et son équipe est-elle la preuve que les distributions structu-

rées des galaxies satellites sont la norme ? Les réponses à ces questions ne sont pourtant pas prévues par les modèles de formation des galaxies.

Quelle est l'origine du disque d'Andromède ? Selon les auteurs, un groupe compact de galaxies naines pourrait avoir été capturé et s'être étalé en un disque au fil des orbites. Ce groupe pourrait néanmoins dû être plus serré que le disque, ce qui est peu plausible. Une autre possibilité est que l'accrétion se soit déroulée le long de filaments de matière, fortuitement alignés dans le même plan. Enfin, le disque pourrait résulter de l'accrétion d'une grosse galaxie riche en gaz, qui aurait engendré, via les forces de marée, un chapitre de galaxies naines.

Quoi qu'il en soit, au problème classique du manque de satellites autour des galaxies géantes, il faut désormais ajouter celui de leur répartition...

Philippe Bibeau-Côté

Nature, vol. 492, no 7425, 2012

Archéologie

Un collyre de plus de 2 000 ans

Un minuscule creux à bord avec son équipement. Le bateau sombre face à la côte de ce qui deviendra Pozzoli, en Toscane. Quelque 2 140 ans plus tard, on constate que la dégradation des composés de zinc

que recouvrait l'une des boîtes à pilules de l'homme de l'art l'a fortement altérée... tant et si bien qu'elle est protégée de l'air de mer les empêchant de pénétrer de quatre centimètres de diamètre qu'elle contient! L'équipe internationale

de Giancarlo Giachi, de la Superintendenza archéologica de Toscane, vient d'analyser ce contenu. L'étude a révélé qu'un mélange d'or et de zinc constitue le principal ingrédient et probablement le principe actif des pilules. Ces dernières étaient aussi mêlées d'amidon de blé, de traces de diverses légumineuses, tandis que leur formation faisait appel à un mélange d'huile d'olive et de cire d'abeille. Pour G. Giachi, la composition des pilules suggère qu'on les délayait dans un liquide pour préparer des collyres.

→ François Savatier

PNAS, en ligne le 7 janvier 2013

La boîte à pilules fermée...



...puis ouverte, vue de dessus.



© G. Giachi, Superintendenza archéologica de Toscane

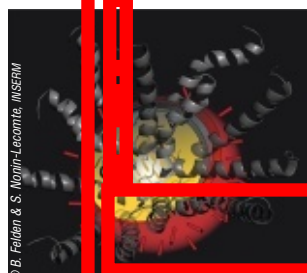
Biologie

La bombe à retardement des bactéries

On connaît l'antitoxine des abeilles, qui se sacrifient en punissant un intrus. Le staphylocoque doré pourrait avoir développé une stratégie similaire. C'est ce qui vient de montrer Nour Sayed, du Laboratoire de biochimie pharmaceutique (INSERM U836-UPRES EA2311) de l'Université de Rennes 1, Sylvie Nonin-Leconte, du Laboratoire de cristallographie et RMN biologiques (CNRS UMR8015) à l'Université Paris-Descartes, et leurs collègues. Les biologistes ont mis en évidence, chez cette bactérie, un système toxine-antitoxine qui permet la destruction de la membrane bactérienne en réponse à des variations brutales de l'environnement.

Nombre d'espèces de bactéries et d'archées produisent des systèmes toxine-antitoxine. Constitués d'une toxine stable et d'une antitoxine instable, ils fonctionnent tous sur le même principe : quand l'antitoxine est

dégradée, la toxine qu'elle neutralisait est libérée et provoque la mort cellulaire. Malgré l'abondance de ces systèmes parmi ces règnes, leur fonction est encore mal comprise. Quel avantage



Lorsqu'il est plus réprimé, le peptide *PepA* (en gris) détruit la membrane de la bactérie (en rouge).

sélectif pour cerner cette stratégie? Pour le savoir, les biologistes ont recherché, découvert et caractérisé un tel système chez le staphylocoque doré, une bactérie responsable de graves infections chez l'homme.

La toxine est un petit peptide en forme d'hélice nommé

PepA dont la synthèse est réprimée par une molécule d'ARN, l'antitoxine. Lorsqu'un stress (oxydation, acidification) diminue la concentration de l'antitoxine, le peptide est produit et s'insère dans la membrane de la bactérie, qu'il détruit, probablement en formant des pores. Cette stratégie pourrait faciliter la colonisation des organismes infectés : libérés par la bactérie kamikaze, les peptides détruisent les membranes des cellules hôtes, permettant à d'autres bactéries d'échapper aux compartiments qui, dans la cellule, détruisent les agents pathogènes et les anéantissent.

Une piste pour de nouveaux antibiotiques? Les biologistes, qui ont déposé un brevet, ont bon espoir : reste à trouver un moyen de déclencher la synthèse du peptide chez tous les individus de la population bactérienne.

→ Marie-Neige Cordonnier

N. Sayed et al., JBC, vol. 287(52), pp. 43454-43463, 2012

En bref

Protéine antigél

Pour survivre à des températures inférieures à 0°C, certains organismes synthétisent des protéines antigel. Ces molécules se lient aux cristaux en formation et abaissent localement la température de gel. Konrad Meister, de l'Université de la Ruhr, et ses collègues ont montré que les protéines antigel de la larve du scarabée *Dendroica canadensis* ont une action à distance : elles empêchent la formation de cristaux de la formation des cristaux.

Sport et motivation

« Faire du sport » est l'une des résolutions classiques pour la nouvelle année. Mais elle n'est pas toujours facile à tenir. La faute à un manque de plaisir lors de l'activité physique? Une équipe de l'INSERM a montré que chez des souris dépourvues du récepteur des cannabinoïdes CB1 dans l'aire tegmentaire ventrale, une aire du cerveau associée aux systèmes de motivation et de récompense, le temps durant lequel les animaux se livrent à l'exercice diminue de 10 à 30 pour cent.

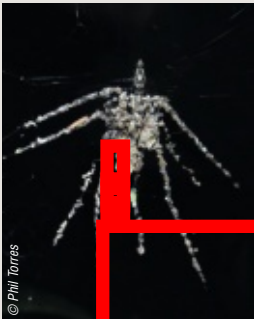
Sable et microgravité

Sur Terre, un écoulement de matériau granulaire, tel du sable, a deux composantes : un mouvement global, induit, et un écoulement secondaire de type convectif, qui mélange les couches supérieures du matériau avec les couches inférieures. Une expérience réalisée en microgravité, à bord d'un avion effectuant des vols paraboliques, a mis en évidence que l'écoulement convectif disparaît en l'absence de gravité, et que son importance augmente avec l'intensité de la gravité. De quoi mieux comprendre le comportement des matériaux granulaires, omniprésents dans la nature et dans l'industrie.

Environnement

Araignée sculptrice

Une araignée... peut en cacher une autre. L'araignée ci-dessous, découverte en septembre 2012 dans la forêt amazonienne péruvienne, est une sculpture réalisée par une araignée cinq fois plus petite. Constituée de débris, de fragments de plantes et d'insectes morts, la fausse araignée ressemble à s'y méprendre à



sa créatrice. Pourquoi un tel édifice, qui risque de la faire repérer par ses prédateurs? Peut-être pour se protéger. L'araignée *Cyclosa mulmeinensis* détourne ses prédateurs en décorant sa toile d'amas de débris qui les attirent. La petite araignée aurait-elle développé une stratégie similaire? Les premières analyses indiquent qu'il s'agirait d'une nouvelle espèce du genre *Cyclosa*. La première, en tout cas, dont le leurre présente des pattes.

Anthropologie physique

Marcher sur les arbres

Au cours de l'évolution, la structure osseuse de la cheville des préhumains est devenue de moins en moins favorable à la flexion du pied. Voilà, brièvement résumée, la logique développée par les paléanthropologues au cours de leurs études comparatives des os des chevilles des ancêtres des chimpanzés, des gorilles, des orangs-outans et des humains (des hominés). Or il s'avère que les performances des os des chevilles de certains *Homo sapiens* actuels sont les mêmes que celles des chimpanzés!

Vivek Venkataraman et ses collègues du Dartmouth College à Hanover, aux États-Unis, ont étudié les ascensions de chasseurs-cueilleurs de la forêt de l'Ituri au Congo (RDC). Ils profitent de leur petite taille pour grimper sur des arbres de petit diamètre, comme les chimpanzés le font; ils accomplissent ces ascensions

sans aide matérielle afin de s'élever dans la forêt équatoriale à la recherche de fruits, de miel ou de proies. Pour effectuer ces mouvements, ces Pygmées fléchissent leurs pieds au-delà de 45 degrés, ce dont sont incapables les autres *Homo sapiens*. Cette flexion extrême est rendue possible par un allongement notable des fibres musculaires du mollet, adaptation que l'on retrouve aussi chez les *Akta*, des chasseurs-cueilleurs d'Asie du Sud-Est. La morphologie que les Pygmées (des négroïdes) qui montent aussi souvent aux arbres.

Or chez les Pygmées que chez les *Akta*, la structure osseuse de la cheville est identique à celle de tous les contemporains. On peut en conclure une chose : si nos ancêtres australopitèques ont grimpé aux arbres grâce à des chevilles à la structure osseuse adaptée à la marche, cela n'interdit pas qu'ils aient pu avoir un



mode de vie en partie arboricole. Lucy, qui ne mesurait que de 1,10 à 1,20 mètre de haut et qui avait de longs bras, pouvait sans doute « marcher » encore plus facilement sur les arbres que les Pygmées, hauts de 1,5 mètre et dotés de simples bras humains.

→ F. S.

V. V. Venkataraman et al., PNAS, en ligne le 31 décembre 2012

Physique

L'art de couper net

Tout le monde sait d'expérience que pour bien couper un légume, il faut appliquer un mouvement de cisaillement parallèle à la surface avec un couteau. Une pression perpendiculaire, seule, déforme une force importante et provoque souvent le déchirement du matériau autour de la zone de coupe.

Étienne Reyssat, de l'Université Harvard, et ses collègues ont modélisé les effets des mouvements de coupe perpendiculaire et tangentielle à la surface. Ils ont étudié la découpe d'un gel d'agar avec un fil maintenu parallèle à la surface. Un dispositif donne au fil une vitesse de découpe constante,

dont les deux composantes de la vitesse perpendiculaire à la surface et la vitesse de cisaillement, horizontale, sont ajustables.

Les physiciens ont mis en évidence que lorsque la vitesse de cisaillement est nulle, le gel résiste d'abord avec une force proportionnelle à la pénétration du fil. Les chaînes de polymères du gel s'étirent et celui-ci se déforme. La réaction du matériau n'est pas localisée uniquement près du fil, ce qui implique que la force nécessaire à la progression du fil est importante. Mais certains polymères finissent par rompre et une fracture s'ouvre dans le gel. La force

de cisaillement chute brutalement pour devenir constante. Les déformations sont alors concentrées sur le front de fracture, ce qui facilite la rupture des polymères.

Lorsqu'on ajoute une force de cisaillement, le gel se déchire plus rapidement. Le mouvement de cisaillement crée des frottements qui apportent une tension supplémentaire sur les polymères. La fracture s'amorce alors pour une force de pénétration du fil moindre. En revanche, une fois la fracture amorcée, l'action du cisaillement devient négligeable.

→ Sean Bailly

É. Reyssat et al., *Physical Review Letters*, vol. 109, 244301, 2012



Astronomie

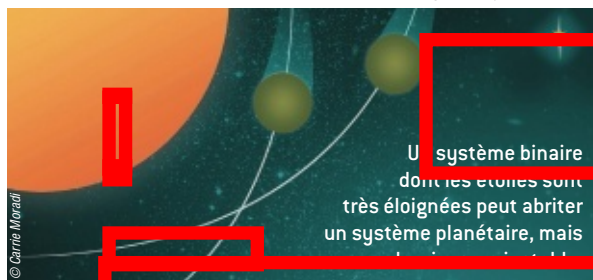
Exoplanètes en danger

De nombreuses étoiles appartiennent à des systèmes binaires dits larges, où les deux astres sont très distants l'un de l'autre. Les planètes qui orbitent autour de l'une des deux étoiles, mais Nathan Kaib, de l'Université Queen, au Canada, et ses collègues ont montré qu'elles finissent par être notablement perturbées par l'étoile compagnon.

Les deux étoiles d'un système binaire tournent autour de son centre de gravité. Les astronomes ont simulé sur ordinateur l'évolution de plusieurs milliers de systèmes binaires larges. Ces systèmes sont soumis à des forces de marée galactique et aux effets gravitationnels d'étoiles passant à proximité, qui rendent plus elliptiques les trajectoires des deux étoiles. Au bout d'une durée de l'ordre du milliard d'années, celles-ci finissent par passer relativement près l'une de l'autre à chaque révolution, perturbant l'orbite des éventuelles planètes présentes. Certaines entrent en collision avec leur étoile ou sont éjectées du système stellaire.

→ Guillaume Jacquemont

N. Kaib et al., *Nature*, en ligne le 6 janvier 2013



Un système binaire dont les étoiles sont très éloignées peut abriter un système planétaire, mais...

Archéologie

Le fromage, crée en Europe ?

Le lait de vache est normalement indigeste pour un adulte. Comment en profiter malgré tout ? En transformant le lait en fromage. Une équipe de chercheurs vient de prouver que les paysans de la culture dite rubanée, qui vivaient sur les bords de la Vistule (Pologne) il y a plus de sept millénaires, maîtrisaient ce savoir-faire, ce qui suggère qu'il a été inventé en Europe.

Les plus anciennes preuves de traite d'animaux laitiers remontent au VII^e millénaire avant notre ère. Elles consistent en restes de poteries contenant des résidus d'acides gras issus du lait, mis en évidence par chromatographie en phase gazeuse. Mélanie Salque, de l'Université de Bristol, et ses collègues ont appliqué la même technique d'analyse à 50 tessons ressemblant à des fragments de faisselles en céramique, datant de 5200 à 4800 ans avant notre ère et retrouvés le long de la Vistule. Verdict : 40 pour cent des tessons contiennent des résidus de lait. L'analyse de restes lipidiques par gramme de poterie, dont la composition isotopique est caractéristique du lait de ruminants. Il s'agit donc bien de faisselles !

→ François Savatier

M. Salque et al., *Nature*, en ligne le 12 décembre 2012

Génétique

Mal des montagnes : l'adaptation en Éthiopie

Respirer en haute montagne est difficile à cause du manque d'oxygène et de la baisse de la pression atmosphérique. Notre organisme s'adapte de diverses façons, en accélérant le rythme cardiaque, le rythme cardiaque, et en augmentant la quantité d'hémoglobine dans le sang.

Cynthia Beall, de l'Université Case Western, et ses collègues ont étudié deux tribus éthiopiennes, l'une installée en altitude depuis au moins 5 000 ans et l'autre plus récemment arrivée. L'adaptation physiologique de la première est semblable à celle des Tibétains.

Le mal des montagnes touche certaines personnes lors d'une ascension rapide. Ses symptômes sont nombreux : fatigue, maux de tête, vomissements, vertiges ou encore insomnies. Il existe une forme chronique du mal des montagnes qui se développe chez les populations vivant à haute altitude. Cette maladie fut décrite en 1925 par le médecin péruvien Carlos Monge, et porte son nom. Elle apparaît progressivement et correspond à une perte des capacités à vivre dans un milieu pauvre en oxygène. Le sang s'enrichit en globules rouges et perd en

fluidité, ce qui peut provoquer des complications cardiaques.

Les deux tribus éthiopiennes étudiées par l'équipe de C. Beall habitent des plateaux à plus de 2500 mètres d'altitude. Les Oromos vivent à cette altitude depuis 500 ans environ tandis que les Amharas y sont établis il y a plus de 5 000 ans. Par ailleurs, une partie de chaque groupe vit à basse altitude. Ainsi, on note que la concentration d'hémoglobine pour les habitants de haute montagne est deux fois supérieure à celle pour les autres. Mais la différence est le double chez les Oromos.

Les Amharas compensent par un rythme respiratoire plus élevé. Leur adaptation ressemble à celle des Tibétains et pourrait aussi avoir une origine génétique. Chez les Tibétains, deux gènes intervenaient dans la réponse de l'organisme au manque d'oxygène et dans la fabrication des globules rouges, et permettraient d'expliquer que l'hémoglobine n'est pas si abondante. Chez les Amharas, d'autres gènes sont probablement impliqués.

→ C. R.

C. Alkorta-Aranburu et al., *PloS Genetics*, vol. 8(12), e1003110, 2012



Un village des hauts plateaux éthiopiens.

Astronomie

Une jeune étoile et ses planètes partagent leur repas

Dans un système stellaire jeune, l'étoile et les proto-planètes se nourrissent de la matière du disque de poussière et de gaz environnant. Comme les planètes nettoient de larges couloirs sur leur orbite, l'étoile se trouve coupée de la région externe du disque. Simon Casassus, de l'Université du Chili à Santiago, et ses collègues ont utilisé l'interféromètre ALMA (Atacama Large Millimeter Array) pour étudier l'étoile jeune HD 142527, située à 450 années-lumière. Ils ont détecté deux filaments de matière qui se dirigent

de la région externe, et qui alimentent les planètes et l'étoile en traversant la zone dépourvue de poussière.

Le disque est constitué d'une partie interne large d'une dizaine d'unités astronomiques et d'une partie externe, au-delà de 140 unités astronomiques. Entre les deux, la région pauvre en poussière aurait été creusée par le passage de proto-planètes en orbite. Celles-ci attirent la matière proche, ce qui leur permet de continuer de grandir.

L'étoile aussi continue de



Vue d'artiste de HD 142527

du disque interne. Mais étant donné la taille et la jeunesse de la jeune étoile, S. Casassus et ses collègues ont montré que

l'autre en moins d'une année. Ce n'est pas le cas, car ce dernier est alimenté par deux ponts de gaz, des filaments relativement étroits traversant la zone pauvre en poussière. Comment se sont formés ces ponts ? Les protoplanètes captent le gaz de la région externe par attraction gravitationnelle. Cependant, une grande partie du gaz acquiert assez de vitesse pour traverser les planètes en formation et continuer vers l'étoile.

→ S. B.

Jusqu'à 9 % : ce serait la proportion de méthane qui s'échappe dans l'atmosphère lors de l'exploitation d'un puits de gaz de schiste.

Nanotechnologies

Absorber la lumière avec des nanocubes

Comment mettre au point des panneaux solaires plus efficaces ? L'une des réponses est d'absorber au maximum la lumière incidente, que l'on convertit ensuite en élec-

tricité ou en chaleur. Antoine Moreau, de l'Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand, et ses collègues de l'Université Duke, aux États-Unis, ont conçu des métamatériaux très

peu réfléchissants en utilisant des nanocubes d'argent.

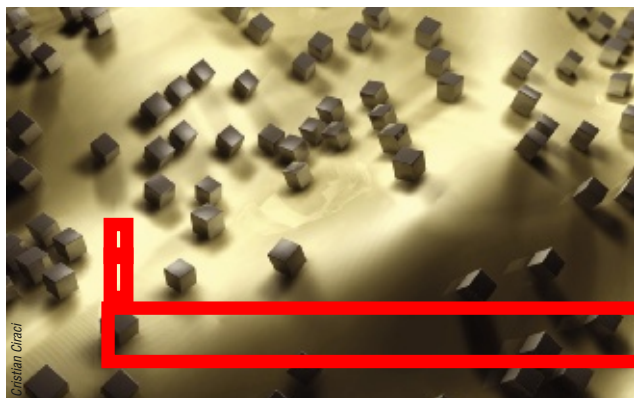
Les métamatériaux sont obtenus en formant sur une surface, par des techniques de lithographie, des motifs nanométriques qui en altèrent les propriétés optiques. Cette méthode est lente et coûteuse. A. Moreau et ses collègues ont utilisé une technique plus simple, qui consiste à disperser de façon aléatoire des nanocubes d'argent sur une mince couche d'or. Les nanocubes, de 74 nanomètres de côté environ, peuvent être fabriqués en grande quantité par des procédés chimiques. De taille inférieure aux longueurs d'onde de la lumière visible (entre 300 et 700 nanomètres), les

chercheurs ont placé un film de polymère isolant de quelques nanomètres d'épaisseur. L'espace créé entre les cubes et la couche d'or sert de cavité résonante pour les électrons, qui sont excités par la lumière. L'énergie confinée dans cet espace finit par se dissiper dans la couche d'or.

En couvrant ainsi 7,3 pour cent de la surface d'or avec des nanocubes, les chercheurs ont réussi à réduire la réflexion lumineuse de plus de 50 pour cent, pour une longueur d'onde proche de 650 nanomètres. Avec 17,1 pour cent de la surface couverte des nanocubes, la réflexion n'est plus que de 7 pour cent de celle de la couche d'or nue.

→ S. B.

A. Moreau et al., *Nature*, vol. 492, pp. 86-90, 2012



Des nanocubes d'argent dispersés sur une surface métallique augmentent considérablement l'absorption de la lumière.

Tous les mois, prenez un grand bol d'air avec

POUR LA SCIENCE



...ABONNEZ-VOUS!

16 numéros par an • 19 euros

+ de 25 % de réduction !
par rapport au prix en kiosque

BULLETIN D'ABONNEMENT

À découper ou photocopier et à retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science • Service Abonnements • Libre réponse 90 382 • 75 281 Paris cedex 06

POUR LA
SCIENCE



1 ☐ Oui, j'abonne à **Pour la Science** (12 n°s/an) + **Dossier Pour la Science** (4 n°s/an) au prix de **19€ par trimestre** ou 76€ par an. Je reçois 16 numéros par an et bénéficie aussi des ventes numériques en créant mon compte sur www.pourlascience.fr

2 J'indique mes coordonnées :

Nom : _____ Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____ Tél. (facultatif) : _____

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscule).

3 Je choisis mon mode de règlement

☐ Je règle en **douceur 19€/trimestre***. Je remplis la grille d'autorisation de prélèvement ci-dessous en joignant impérativement un RIB.

* Abonnement valable uniquement en France métropolitaine, renouvelable à échéance par tacite reconduction et dénonçable à tout moment avec un préavis de 3 mois.

Autorisation de prélèvement (à remplir) : Je donne par **Pour la Science**, Je vous demande de faire apparaître mes prélèvements sur mes relevés de compte bancaire. Je m'adresserai directement à **Pour la Science** pour tout ce qui concerne le fonctionnement de mon abonnement.

Titulaire du compte : _____
Nom, Prénom : _____ Établissement : _____ à débiter
N° : _____ Établissement : _____
Code postal : _____ Ville : _____ Rue : _____
Code postal : _____ Ville : _____

Compte à débiter : _____
Établissement : _____ Code quibot : _____ N° de compte : _____ Clé RIB : _____
Signature (obligatoire) : _____

☐ Je préfère régler mon abonnement comptant en une seule fois par :

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

☐ par carte bancaire

N° : _____ Expire fin : _____ Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) : _____

Signature obligatoire : _____

En application de la loi du 6 janvier 1978 (n°78-17 du 6-1-1978 relative à l'accès à l'information), 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. Vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre ☐

PLS424 - Offre réservée aux abonnés, valable jusqu'au 28.02.2013

Climatologie

Imprévisible El Niño

Le phénomène d'oscillation australe El Niño, ou ENSO, est un cycle climatique qui se produit tous les deux à sept ans dans la région de l'océan Pacifique. Il perturbe divers facteurs (température, pluies...) et influe sur le climat mondial. Grâce à l'analyse de « carottes » de coraux prélevées sur des îles équatoriales, Kim Cobb, de l'Institut de technologie de Géorgie, aux États-Unis, et ses collègues ont reconstitué ses variations dans la région des prélèvements pendant les 7000 dernières années.

La richesse des coraux en certains isotopes de l'oxygène permet de dater les changements de température et donc l'intensité du phénomène ENSO. Cette intensité aurait beaucoup varié, pour des raisons mal comprises. El Niño est décidément un phénomène difficile à prévoir.

→ G. J.

K. Cobb et al., Science, en ligne le 3 janvier 2012

Psychologie

L'illusion de la fin de l'histoire

Avez-vous beaucoup changé au cours des dix dernières années ? Changerez-vous beaucoup lors des dix prochaines ? Selon Joram Quoidbach, de l'Université Harvard, aux États-Unis, et ses collègues, vous répondrez le plus souvent oui à la première question, et non à la seconde – et ce quel que soit votre âge. En d'autres termes, on a toujours l'impression que sa personnalité, ses valeurs et ses goûts ont fini d'évoluer au moment présent, ce que les chercheurs qualifient « d'illusion de la fin de l'histoire ».

Grâce à divers tests psychologiques, les auteurs de l'étude ont quantifié à quel point une tranche d'âge pensait avoir changé au cours de la décennie précédente, et combien elle estimait qu'elle changerait au cours de la décennie suivante. Ils ont ensuite comparé les prévisions des sujets d'un âge donné aux souvenirs des sujets âgés de dix ans de plus. Leur conclusion : on sous-estime systématiquement les changements à venir.

→ G. J.

J. Quoidbach et al., Science, en ligne le 4 janvier 2013

DERNIÈRE minute...

OBÉSITÉ ET ALZHEIMER

Une équipe de chercheurs lillois (INSERM, Université de Lille, Institut Pasteur) dirigée par Luc Buée et David Blum a montré que les souris obèses ont davantage de risques de développer des symptômes de la maladie d'Alzheimer. Des souris transgéniques qui développent des dégénérescences neurofibrillaires constituées de protéines tau, caractéristiques de la maladie, ont reçu une alimentation riche. Au bout de six mois,

ces souris obèses présentaient plus de lésions cérébrales et leur mémoire était plus altérée que les souris de la même souche ayant reçu une alimentation équilibrée.

UN NANOMOTEUR COMMANDABLE

Seulement 100 atomes constituent le nanomoteur que l'on vient d'élaborer. Une équipe franco-américaine (CEMES/CNRS et Université d'Ohio). Grâce à des électrons fournis par un microscope à effet tunnel, un rotor

moléculaire tourne autour d'un stator, fixé sur une feuille d'or. D'un diamètre de deux nanomètres, c'est le plus petit moteur dont on puisse contrôler le sens de rotation. Ce sens est déterminé par le sens de rotation du rotor ou l'on place la pointe du microscope à effet tunnel.

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



Microbiologie

Résistance des bactéries : un nouveau mécanisme

Mycobacterium smegmatis, bactérie proche de celle responsable de la tuberculose, a développé une stratégie étonnante qui lui permet de résister à un antibiotique antituberculeux, l'isoniazide, ont montré Y. Wakamoto et N. Dhar à l'école polytechnique fédérale de Lausanne et leurs collègues. Contrairement à la stratégie dite des bactéries persistantes, celle-ci n'est pas liée à la vitesse de croissance des bactéries, mais à l'expression intermittente d'une de leurs enzymes, nommée KatG.

En réponse à un stress (tel qu'un antibiotique), les bactéries persistantes entrent dans une sorte d'hibernation qui ralentit leur métabolisme, et donc leur croissance. Les antibiotiques, en général ciblés sur une étape du métabolisme, ont alors peu d'effet. Par télescopie microscopie, les biologistes ont observé que les bactéries *M. smegmatis* qui résistent à l'isoniazide ne sont pas celles qui

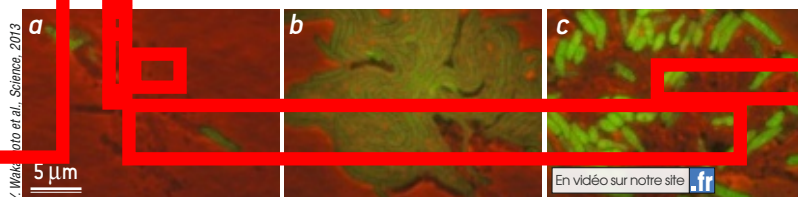
ralentissent leur croissance, mais celles dont l'rythme de production de KatG est le plus lent.

L'isoniazide est un « promédicament » qui n'agit qu'après activation par un composant bactérien – ici KatG. Or les biologistes ont montré que chaque bactérie produit l'enzyme par pulsations aléatoires. En outre, non seulement les pulsations sont corrélées à la mort des bactéries, mais les chances de survie dépendent du délai entre deux pulsations. Les pulsations peu fréquentes favoriseraient la résistance, peut-être parce qu'elles ne permettent pas d'atteindre le niveau d'antibiotique activé létal pour la population bactérienne.

Le mécanisme de ces pulsations reste inconnu, mais il pourrait être le résultat d'une adaptation de la population bactérienne à l'antibiotique, les variants les plus sensibles ayant été éliminés.

→ M.-N. C.

Y. Wakamoto et al., Science, vol. 339, pp. 91-95, 2013



Après traitement à l'isoniazide (a) et avant un nouveau traitement (b), les bactéries *M. smegmatis* résistantes (en vert) se multiplient (b).

ACTUELLEMENT EN KIOSQUE

et sur www.pourlascience.fr/editionsnumeriques



Dossier Pour la Science n° 78

Les nuages et les vents sont au cœur des attentions des climatologues et des météorologues. Les premiers s'intéressent à leurs interactions avec le réchauffement climatique. Les seconds cherchent à prédire le temps qu'il fera demain, mais aussi les manifestations extrêmes (tornades, orages, cyclones...). Un numéro pour rester le nez au vent et la tête dans les nuages !

Parution janvier / mars 2013 – Prix : 6,95 €

Cerveau & Psycho n° 55

L'épilepsie est une maladie neurologique répandue et souvent handicapante, le sujet concerné vivant dans la hantise de la survenue d'une crise. La maladie est complexe, mais ses bases neurobiologiques commencent à être élucidées.

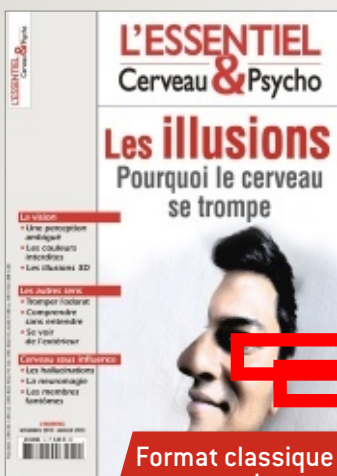
Et aussi : le syndrome Hikikomori.

l'influence de la forme des aliments sur leur goût ou la personnalité reflétée par les mains.

Parution janvier / février 2013 – Prix : 6,95 €



Format classique
ou pocket



L'Essentiel Cerveau & Psycho n° 12

Vision, audition, odorat, toucher... Tous nos sens sont les jouets d'illusions ! Découvrez notamment dans ce numéro les mécanismes des trompe-l'œil ; les couleurs interdites ; pourquoi le temps s'étire ou file selon notre humeur ; comment la magie trompe le cerveau, etc. Si ces anomalies de perception font notre plaisir, elles inspirent également les neuroscientifiques qui étudient le fonctionnement du cerveau lésé.

Parution de novembre 2012 / janvier 2013 – Prix : 6,95 €

Format classique
ou pocket

En kiosque dès le 8 février :

L'Essentiel Cerveau & Psycho n° 13 sur la maladie d'Alzheimer.

POINT DE VUE

Dérembourser les contraceptifs oraux de 3^e génération : une aberration

Du ces pilules sont dangereuses et il faut les interdire, ou elles sont sans risque accru et il faut les rembourser.

Israël NORD

Le 3 janvier, Marisol Touraine, ministre des Affaires sociales et de la Santé, a annoncé que les pilules contraceptives de 3^e génération ne seront plus remboursées dès le 31 mars prochain, avançant de six mois un déremboursement déjà annoncé en septembre dernier. La raison ? Des études auraient montré que le risque de thrombose veineuse serait double par rapport à la contraception orale de 2^e génération. Les pilules de 3^e génération sont-elles à proscrire ? Les études invoquées ne sont pas suffisantes pour conclure à leur dangerosité.

Les contraceptifs dont il est question ici sont des pilules combinant des formes synthétiques des deux hormones produites par les ovaires et impliquées dans la régulation du cycle menstruel, l'œstrogène (famille des œstrogènes) et la progestérone. Selon le progestatif utilisé (la forme synthétique imitant la progestérone), ces pilules, nommées contraceptifs oraux combinés, ont été divisées en trois « générations », classées par ordre d'apparition sur le marché. Les différentes générations de contraceptifs utilisent toutes le même œstrogène de synthèse, l'éthinylœstadiol, à des concentrations variées.

L'annonce de septembre dernier faisait suite à deux rapports récents : d'une part, une revue, effectuée en mai 2011 par l'Agence européenne du médicament, des dernières publications sur les risques thromboemboliques associés à des pilules de 4^e génération ; d'autre part, la réévaluation, en juin 2012, des contraceptifs oraux de 3^e génération par la Commission de la transparence de la Haute autorité de santé, saisie sur ce sujet en

décembre 2011 par la Direction générale de la santé. Il s'agissait en particulier d'apprécier le service médical rendu par ces traitements, leur place dans la stratégie thérapeutique et leur coût pour le système de prise en charge. Les contraceptifs de 4^e génération n'étant pas remboursés, ils n'étaient pas concernés.

Une thrombose veineuse est la formation d'un caillot dans une veine. Les thromboses veineuses surviennent en général dans les jambes. Leurs conséquences peuvent être graves : le caillot se détache de la paroi veineuse : il peut en résulter une embolie, c'est-à-dire un caillot dans une artère, qui peut être fatale. Le risque thromboembolique existe en dehors de toute contraception orale : il est

études ne permettent pas de savoir s'il y a eu des biais dans le recrutement des femmes, notamment si celles qui ont pris des contraceptifs de 3^e génération avaient un risque thromboembolique plus élevé que les autres.

Seule une analyse – au Danemark – a été effectuée sur une cohorte, c'est-à-dire sur une population de femmes de 15 à 49 ans sélectionnées (hors période de grossesse, sans antécédent de cancer ni de maladie cardiovasculaire) et suivies de 1995 à 2005. Cette étude indique que pour une même dose d'œstrogène, la proportion d'événements thromboemboliques était 1,8 fois plus élevée pour certains contraceptifs de 3^e génération (à base de désogestrel et de gestodène) par rapport à celle

enregistrée pour ceux de 2^e génération (à base de lévonorgestrel), mais équivalente pour les autres de 3^e génération (à base de norgestimate).

De surcroît, pour un progestatif donné, le risque thromboembolique diminue avec la dose d'œstrogène. Ce dernier résultat corrobore ce fait que jusqu'à présent, aucun risque thromboembolique accru n'a été associé aux contraceptifs oraux à base de progestatif seul, sans œstrogène (il en existe deux, *Microval*, à base de lévonorgestrel et *Cérazette*, à base de désogestrel).

Si cette analyse présente un niveau de preuve supérieur à celui des études cas-témoins, elle ne suffit pas, à elle seule, pour conclure que les pilules de 3^e génération augmentent le risque thromboembolique par rapport à celles de 2^e génération. En choisissant de ne plus rembourser les contraceptifs de 3^e génération, le gouvernement

NE SERA-IL PAS PLUS INDIVIDUEL DE rembourser Cérazette, la pilule la plus dénuée de risque thromboembolique qui soit ?

estimé à 0,6 à 1 cas pour 10 000 femmes non utilisatrices de pilules par an, ce qui est très faible. Il augmente à 2 cas pour 10 000 parmi les femmes prenant une contraception de 2^e génération à base de lévonorgestrel (la plupart des pilules de 2^e génération). Et selon les études citées dans ces rapports, le risque serait de 3 à 4 cas pour 10 000 femmes utilisatrices de contraceptifs de 3^e génération.

Or ces études – neuf en tout, dont seulement trois concernent les contraceptifs de 3^e génération – sont pour la plupart des études cas-témoins, c'est-à-dire des études observationnelles rétrospectives : à partir de registres, *a posteriori*, on recense le nombre de femmes ayant eu une thrombose veineuse et la contraception qu'elles utilisent. De telles

français fait tout simplement une économie de plusieurs dizaines de millions d'euros sur les dépenses de santé. Les seules victimes en seront les femmes. Devant la variété de leurs profils hormonaux, il est nécessaire de disposer d'un large spectre de contraceptifs afin d'adapter le traitement à chaque cas – allier tolérance et efficacité tout en tenant compte de facteurs de risque et contre-indications (tabagisme, cholestérol, antécédents familiaux, mais que des maladies cardio-vasculaires). Quand une femme ne supporte pas une pilule de 2^e génération, qu'elle a des nausées, de l'acné, qu'elle saigne, il faut pouvoir lui prescrire une pilule de 3^e génération si ses antécédents le permettent.

Toute contraception doit s'accompagner d'un entretien approfondi avec un médecin, d'un examen sanguin et d'un suivi régulier.

Les contraceptifs oraux, combinés ou non, sont parmi les moyens les plus efficaces pour la prévention des grossesses non désirées. D'autres tout aussi efficaces sont insuffisamment utilisés en France pour diverses raisons. Le implant sous le bras, pour trois ans, d'un contraceptif à base de progestatif, beaucoup pratiqué aux États-Unis, présente l'avantage par rapport à la pilule, de ne pouvoir être oublié. Il est cependant peu prescrit en France, car, dans un cas sur six à sept, on est obligé de le retirer dans les trois mois à cause de désagréments (acné, prise de poids ou saignements pendant le cycle). Les stérilets, dispositifs intra-utérins au progestatif ou au cuivre, ne sont pas prescrits aux

adolescentes, car ils nécessitent un examen gynécologique considéré comme superflu et agressif à cet âge.

Lorsque thromboembolique existe même sans contraception. Il est multiplié par six lors d'une grossesse. Au lieu de jeter l'anathème sur les contraceptifs oraux de 3^e et 4^e générations en fonction de données scientifiques insuffisantes et au risque de voir nombre de jeunes femmes paniquées arrêter toute contraception et tomber enceintes, au lieu de rembourser par ailleurs à 100 pour cent les interruptions volontaires de grossesse, ne serait-il pas plus judicieux de rembourser Cérazette, la pilule la plus dénuée de risque thromboembolique qui soit, et de rembourser à 100 pour cent l'implant ?

Dr. M. L. AN, gynécologue obstétricien au CHU de Strasbourg.

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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

La diversité génétique, oubliée des politiques de préservation

Une étude européenne a montré que la diversité génétique varie indépendamment de la diversité en espèces. Protéger la seconde ne suffit donc pas à protéger la première.

Pierre TALLERET

La Convention pour la diversité biologique, adoptée à Rio en 1992, représente l'outil de politique internationale le plus important pour la préservation de la biodiversité. Elle stipule que la biodiversité comprend trois niveaux imbriqués : la diversité des écosystèmes, la diversité des espèces composant l'écosystème, et la diversité génétique à l'intérieur de chaque espèce. Les 193 États signataires de cette convention (dont les États-Unis ne font pas partie) doivent donc préserver ces trois niveaux.

Lors de la conception de parcs ou de réserves naturelles, seuls les niveaux « éco-

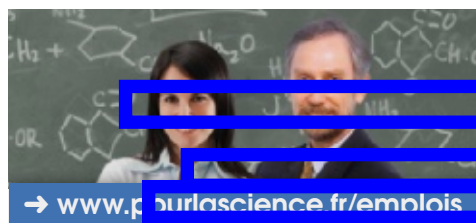
ystème » et « espèce » sont habituellement pris en compte. La diversité génétique intraspécifique est le plus souvent ignorée. La quasi-totalité des actions visant à la préservation ne concernent pas les espèces sauvages mais les animaux domestiques et les plantes cultivées. En outre, elles sont dotées de moyens insuffisants.

Pourtant, une grande diversité génétique favorise la survie à long terme d'une espèce. Elle lui permet de s'adapter plus facilement aux modifications de son environnement et elle facilite la sélection d'une souche résistante lors de la contamination par un pathogène. De plus, diverses

études expérimentales ont montré que les écosystèmes résistent mieux aux perturbations naturelles ou anthropiques si les espèces qui les composent ont une grande diversité génétique.

Plusieurs raisons expliquent que la diversité génétique soit rarement prise en compte dans les politiques de conservation. Premièrement, elle est difficile à évaluer. Deuxièmement, la plupart des scientifiques pensent qu'elle varie comme la richesse en espèces. L'hypothèse proposée en 2004 par

Mark Vellend, du Centre américain d'analyse et de synthèse écologiques. Autrement dit, plus il y a d'espèces dans un milieu,



→ www.pourlascience.fr/emplois

Connectez-vous au service
d'offres d'emplois scientifiques sur

POUR LA
SCIENCE

en partenariat avec
naturejobs



■ Chaque semaine, plus
de **8000 offres d'emploi**
dans le secteur des sciences.

■ En un clic, la sélection
des postes à pourvoir
en France et dans les pays
francophones ou voisins.

■ Une équipe Naturejobs
spécialisée, au service des
recruteurs francophones

Contact : Muriel Lestringuéz
E-mail : m.lestringuéz@nature.com
Tél. : +44 20 7843 4994

POUR LA
SCIENCE

Le site de référence
de l'actualité scientifique

plus la diversité génétique serait élevée à l'intérieur de chaque espèce. M. Vellend avance deux grandes catégories d'argument. Selon la première, les deux niveaux de diversité sont soumis à des processus identiques : ainsi, une forte immigration augmenterait à la fois le nombre d'espèces présentes et la diversité génétique intraspécifique ; à l'opposé, une sélection intense diminuerait simultanément les deux niveaux de diversité. La seconde catégorie d'arguments stipule que les deux niveaux de diversité s'influencent mutuellement par des mécanismes variés. Par exemple, plus les espèces sont génétiquement diverses, moins elles risquent de s'éteindre ; en conséquence, leur nombre reste élevé.

Si l'hypothèse de M. Vellend était vérifiée, en protégeant les espèces, on protégerait aussi la diversité génétique, puisque ces deux niveaux de diversité seraient corrélés. Mais les premières études expérimentales ont donné des résultats contradictoires. En outre, chacune analysait la diversité génétique que pour une seule

espèce. Ces études suggéraient tout de même que la diversité génétique interne des espèces augmente bien avec la richesse en espèces dans les écosystèmes dits en mosaïque (des îles océaniques ou des habitats très fragmentés sur les continents). Dans les autres types d'écosystèmes, aucune conclusion ne faisait consensus.

L'hypothèse de covariation entre la richesse en espèces et la diversité génétique n'a été testée à grande échelle que très récemment. Dans le cadre du projet européen *ContraBioDiv*, un consortium international de 15 laboratoires, coordonné par le nôtre, l'a étudiée pour les plantes alpines (des végétaux vivant au-dessus de 1 500 mètres d'altitude). Les régions montagneuses des Alpes et des Carpates (en Europe centrale) ont été divisées en 561 secteurs d'environ 25 kilomètres de côté, où les chercheurs ont compté le nombre d'espèces de plantes alpines présentes. Ils ont pour cela compilé les données existantes, qu'ils ont complétées par des campagnes sur le terrain. Pour évaluer la diversité génétique, plus de 14 000 spéci-

mens, appartenant à 39 espèces, ont été analysés en laboratoire.

Les chercheurs ont ainsi comparé les deux niveaux de biodiversité sur l'ensemble des deux massifs, Alpes et Carpates. Les résultats, publiés en septembre 2012, indiquent que la richesse en espèces et la diversité génétique varient indépendamment l'une de l'autre. Dans les Alpes, par exemple, c'est une région située au Sud, à la frontière entre la France et l'Italie, qui est la plus riche en espèces, tandis que la plus grande diversité génétique moyenne à l'intérieur de chaque espèce est trouvée au centre et au Nord-Est (en Suisse et en Autriche). L'idée dominante d'une covariation des deux niveaux de biodiversité est donc invalidée, du moins dans les milieux considérés. Pour les Carpates, l'hypothèse de covariation est sans doute vraie, mais elle reste à confirmer.

LA RÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE dans le séquençage de l'ADN devrait permettre de mieux évaluer la diversité génétique.

La diversité génétique est pour l'instant négligée dans les stratégies de conservation, malgré son importance pour le futur des espèces et des écosystèmes. Pour décider de l'attribution du statut de réserve naturelle à une région, il faudrait évaluer aussi bien la diversité génétique intraspécifique que la diversité spécifique. La révolution technologique actuelle dans le séquençage de l'ADN devrait permettre des évaluations à grande échelle de cette diversité génétique, et ainsi conduire à une meilleure application de la Convention pour la diversité biologique.

La France a déjà clairement indiqué la prise en compte de la diversité génétique dans sa « stratégie nationale pour la biodiversité 2011-2020 ». Espérons que cette intention se traduira par des actes et des moyens, et que ceux-ci ne concerneront pas seulement les animaux domestiques et les plantes cultivées.

Pierre TABERLET est chercheur au Laboratoire d'écologie alpine (CNRS UMR 5553) de l'Université Joseph Fourier, à Grenoble.

VRAI OU FAUX

Bronze-t-on derrière une vitre ?

Oui. Une vitre bloque les rayonnements ultraviolets les plus énergétiques, mais en laisse passer d'autres, qui brunissent aussi la peau – et peuvent se révéler nocifs.

Évelyne Sage

Les surfaces vitrées tendent à se multiplier, tant dans les bâtiments que dans les véhicules. On croit souvent que les vitres bloquent les rayonnements ultraviolets (UV) et empêchent ainsi de bronzer ceux qui se trouvent derrière. Qu'en est-il ? Faut-il craindre de s'exposer au soleil derrière une vitre ?

Les rayonnements ultraviolets qui atteignent la surface de la Terre se répartissent en 95 pour cent d'UV-A, les moins énergétiques, dont les longueurs d'onde vont de 320 à 400 nanomètres, et cinq pour cent d'UV-B, de longueurs d'onde comprises entre 290 et 320 nanomètres. Or les deux types d'UV font brunir la peau, mais selon des mécanismes différents.

Les UV-B, les plus énergétiques, déclenchent la synthèse de mélanine, un pigment brun. De fait, ils activent un facteur de transcription (une protéine régulant l'expression des gènes) dans les kératinocytes (les cellules de l'épiderme) ; cela entraîne la synthèse d'une hormone nommée alpha-MSH et d'un peptide opioïde procurant une sensation de bien-être. Les molécules d'alpha-MSH sont libérées dans le milieu extracellulaire et se fixent sur des récepteurs membranaires des mélanocytes, les cellules productrices de mélanine. Il s'ensuit une cascade d'événements qui conduisent à la synthèse de mélanine. Ce pigment est empaqueté dans des granules, les mélanosomes, qui sont libérés puis absorbés par les kératinocytes. Ils viennent se placer au-dessus des noyaux cellulaires (où se

trouve l'essentiel de l'ADN), qu'ils protègent d'une exposition ultérieure aux ultraviolets. Les individus roux ne synthétisent pas de mélanine, de sorte qu'ils brûlent sans bronzer quand ils s'exposent au soleil.

Les UV-A donnent aussi à la peau une pigmentation brun foncé persistante, et ce plus vite que les UV-B, mais cette pigmentation résulte de l'oxydation de la mélanine préexistante et de ses précurseurs, et non d'une nouvelle synthèse de mélanine. Le bronzage dû aux UV-A n'est donc pas photoprotecteur – au contraire, il détruit et disperse les pigments protecteurs. En conséquence, une peau bronzée par les rayonnements sera aussi vulnérable qu'une peau blanche lors d'une exposition ultérieure au soleil.

Visage pâle, bras bronzé

Comment une vitre classique filtre-t-elle ces différents rayonnements ? Elle bloque la plupart des UV-B (seuls les 15 pour cent les moins énergétiques la traversent), mais elle laisse passer presque tous les UV-A. Un double vitrage est plus protecteur, puisqu'il ne transmet que 57 pour cent des ultraviolets, et 33 pour cent s'il est teinté.

En outre, grâce aux innovations de l'industrie du verre, des filtres efficaces sont incorporés dans les vitres modernes. Dans certains bâtiments commerciaux ou résidentiels récents, les vitres bloquent ainsi jusqu'à 99 pour cent des ultraviolets. Dans les automobiles, pour des raisons de sécurité, tous les pare-brise sont en verre laminé

(deux couches de verre sont collées sur une couche intermédiaire en plastique, afin que le verre ne tombe pas sur le conducteur s'il se casse) et ce type de verre arrête plus de 99 pour cent des ultraviolets.

En revanche, les vitres des fenêtres arrière et latérales sont en verre non laminé, moins photoprotecteur. Ainsi, le conducteur et les passagers peuvent recevoir une quantité considérable d'UV-A à travers ces fenêtres, même quand elles sont fermées : les parties de leur corps exposées à cette lumière latérale ou arrière (la main, le bras, l'épaule...) brunissent alors, tandis que celles qui ne reçoivent le soleil que par le pare-brise restent blanches.

Une telle exposition est-elle nocive ? Tous les types d'ultraviolets endommagent l'ADN et les cellules, d'où un risque de cancer de la peau. Les photons UV-B sont plus énergétiques, mais les photons UV-A nous atteignent en plus grand nombre : ils prédominent aussi bien dans la lumière naturelle que dans celle des appareils de bronzage, et ils traversent mieux les vitres et l'épiderme. Dès lors, même que les UV-B soient responsables de la plupart des cancers cutanés, les UV-A peuvent aussi accroître le risque de cancer en particulier de mélanome. En outre, ils contribuent notablement au vieillissement de la peau. Mieux vaut donc éviter une exposition excessive et se protéger par de la crème solaire... même en voiture ! ■

Évelyne SAGE est directrice de recherche dans l'Unité Stress génotoxiques et cancer (CNRS UMR 3348), à l'Institut Curie, Orsay.



La théorie de L'INFORMATION existe-t-elle ?



On ne peut pas définir l'information, mais on peut définir une société de l'information, que les ordinateurs traitent l'information, que nous sommes submergés par l'information, etc. Mais le terme « information » qui revient si souvent a-t-il une signification précise ? Représente-t-il un concept scientifique universel qui témoigne d'un savoir unifié ? Son emploi dans toutes sortes de domaines, de la physique à l'économie en passant par la biologie et la robotique, est-il pertinent ?

On se serait tenté de penser que l'information est une notion fourre-tout, mais elle est plus que cela. On sait la quantifier, du moins dans certains contextes. Plusieurs scientifiques la considèrent même comme une grandeur physique fondamentale, au même titre que l'énergie ou le temps. De fait, l'information est un concept protéiforme qui ne se laisse pas facilement appréhender. L'apparition d'une théorie scientifique de l'information ne date que de quelques décennies, et le concept suscite encore de nombreuses réflexions chez les scientifiques et les philosophes. La théorie de l'information reste, à l'heure actuelle, un édifice inachevé et hétéroclite.

Pour mieux comprendre la place de la notion scientifique d'information aujourd'hui, il est utile d'en esquisser la genèse qui remonte aux années 1920, et le développement. Nous verrons que la théorie de l'information, pour autant que l'on puisse utiliser le singulier, a plusieurs origines et que, en dépit de son caractère inachevé, elle a pénétré de nombreux champs de la pensée et de l'activité humaine.

La théorie de l'information a ainsi orienté l'évolution de certaines disciplines scientifiques. C'est le cas de la biologie moléculaire qui a été dominée dans la seconde moitié du XX^e siècle par des approches fondées sur l'information génétique, selon lesquelles les gènes contiennent

toute l'information qui caractérise un organisme vivant. Dans le domaine des sciences humaines et sociales, des théories comme le structuralisme ou certaines conceptions néolibérales de l'économie s'appuient elles aussi sur une conception essentialiste de l'information.

Par ailleurs, les progrès scientifiques et techniques liés au codage et aux lignes de communication constituent des applications directes de la théorie de l'information et sont au cœur de développements qui ont bouleversé nos vies. Ce sont ces innovations de « l'ère numérique » (ordinateurs, traitement et transmission de textes, d'images ou de sons numérisés, réseau Internet, etc.) qui nous ont rendu familière la représentation de l'information sous la forme d'une suite de 0 et de 1, c'est-à-dire une

Jérôme Segal

Quantifier l'information et en faire un concept scientifique précis : tel est l'objet de la théorie de l'information.

née il y a 65 ans. Une entreprise toujours actuelle, à laquelle les développements de la biologie posent de nouveaux défis.

suite de bits. Une telle suite de bits peut ensuite revêtir diverses formes graphiques, selon le codage choisi : par exemple une succession de traits verticaux parallèles pour les codes à barres, ou un motif carré de niveaux noirs ou blancs pour les codes QR de plus en plus fréquents (voir la figure 1).

Tous ces développements, dont nous n'avons pas fini d'observer les conséquences, ont pour origine les travaux de scientifiques de diverses disciplines qui ont placé leurs textes au centre de leurs réflexions. Une théorie mathématique de la

communication, article publié en 1948 dans *Annals of the New York Academy of Sciences*, et *Cybernétique* -

1. LES CODES QR (QR pour *Quick Response*), inventés en 1994 par l'entreprise japonaise *Denso-Wave*, sont les sortes de codes-barres bidimensionnels de plus en plus répandus. Une telle image, facilement captée et décodée par un téléphone portable muni d'une application adéquate, véhicule le plus souvent l'adresse d'une page Internet, à laquelle on peut immédiatement se connecter. Formé de pixels noirs et blancs en général, un code QR peut représenter jusqu'à 4 296 caractères alphanumériques. La traîne noire dotée d'un motif carré

terminent l'orientation de l'image à décoder.

Commande et communication dans l'animal et la machine, livre publié la même année par un autre Américain, le mathématicien Norbert Wiener.

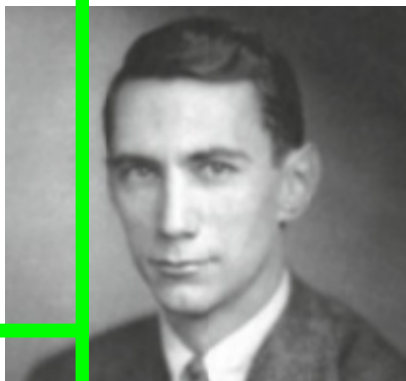
L'information, grandeur scientifique

C'est entre 1910 et 1930, dans trois domaines scientifiques bien différents, que l'information a été conceptualisée comme grandeur scientifique. En physique, ce développement a eu lieu en relation avec l'expérience de pensée du « démon de Maxwell ». Ce démon est un petit être imaginaire censé pouvoir connaître les vitesses et positions de chacune des molécules dans un gaz et qui utilise cette connaissance afin de séparer spatialement les molécules rapides de celles qui sont lentes ; il crée ainsi, à partir d'un gaz de température uniforme, deux régions de températures distinctes, simplement en ouvrant une petite trappe aux moments opportuns (voir l'encadré page ci-contre).

Toutefois, cette transformation étant obtenue moyennant un travail négligeable, elle contredirait le deuxième principe de la thermodynamique, selon lequel l'entropie d'un système isolé ne peut pas décroître. Rappelons que l'entropie est une grandeur fondamentale de la thermodynamique, science élaborée au XIX^e siècle – le siècle de la Révolution industrielle –, qui permet de quantifier la part de l'énergie d'un système transformable en énergie mécanique. Avec les travaux du physicien autrichien Ludwig Boltzmann à la fin du XIX^e siècle, l'entropie a pu être interprétée dans le cadre de la physique statistique comme une mesure du « désordre » d'un système.

Plus précisément, l'entropie (statistique) mesure le nombre d'états microscopiques auxquels peut avoir accès le système considéré compte tenu des contraintes macroscopiques telles que l'énergie totale et le volume (un état microscopique est par exemple caractérisé par les vitesses et positions à un instant donné de chacun des atomes dont est constitué le système).

Ainsi dans le cas d'un gaz de température initiale uniforme et qui se voit séparé en deux régions de températures distinctes, l'entropie diminue (l'« ordre » augmente) et donc le démon de Maxwell semble violer le deuxième principe de la thermodynamique. C'est en réfléchissant à cette expérience de pensée que le physi-



2. QUARANTE PRÉCURSEURS ou protagonistes de la théorie de l'information. De haut en bas, les portraits de : Marjan von Smoluchowski (1872-1917), Ronald Fisher (1890-1962), Claude Shannon (1916-2001) et Norbert Wiener (1894-1964).

cien polonais Marjan von Smoluchowski (1872-1917) a, le premier, souligné le rôle essentiel joué par la connaissance dont jouit le démon. Autrement dit, dès 1912, Smoluchowski a eu l'idée que l'acquisition d'information doit être mise en relation avec la diminution de l'entropie.

Ce lien entre information et entropie a été commenté en 1929 par le physicien hongrois Leo Szilard, et ce dernier a tenté de calculer de combien l'entropie du démon de Maxwell doit augmenter, lorsqu'il acquiert sa connaissance sur une molécule, afin que le deuxième principe de la thermodynamique soit préservé (il a obtenu que l'entropie doit augmenter d'au moins $k_B \ln 2$, où k_B est la constante de Boltzmann, qui relie température et énergie ou entropie et qui est égale à $1,380... \times 10^{-23}$ joule/kelvin, et où $\ln$ désigne le logarithme népérien, mais ce résultat s'est révélé faux).

Dans les années 1950, le physicien français Léon Brillouin poursuit ces réflexions. S'appuyant sur l'expression mathématique de l'information définie par Claude Shannon en 1948, expression identique dans sa forme (au facteur k_B près) à celle de l'entropie de la physique statistique (voir l'encadré page 22), Brillouin alla jusqu'à identifier l'information à l'opposé de l'entropie, la « néguentropie ». Mais cette identification fondamentale entropie-information a divisé la communauté scientifique, et reste à ce jour controversée.

De la statistique des épis de blé à l'information

Un autre domaine où est apparue une définition scientifique de l'information est celui des statistiques. À partir de 1922, le statisticien britannique Ronald Fisher, qui travaillait à la station agronomique de Rothamsted, a cherché à définir la quantité d'information en rapport avec ce qu'apporte un échantillon de données dans la connaissance des paramètres (par exemple la valeur moyenne) caractérisant une loi de distribution statistique des données. Il écrivit ainsi : « L'objet de la méthode statistique est la réduction des données. Il faut remplacer une masse de données, si importante qu'elle en est intelligible, par un nombre relativement petit de quantités qui doivent représenter correctement cette masse, ou, en d'autres mots, doivent contenir la plus grande part possible si ce n'est

la totalité de l'information pertinente contenue dans les données d'origine. »

Supposons par exemple que la longueur des épis de blé soit en principe régie par une « loi normale » – loi statistique représentée par une courbe de Gauss (courbe en forme de cloche où, dans le cas présent, la proportion d'épis ayant une longueur x décroît exponentiellement avec le carré $(x - \mu)^2$ de l'écart à la longueur moyenne μ). Un des problèmes centraux de la théorie statistique consiste à déterminer, à partir de l'échantillon dont on dispose, les paramètres qui caractérisent la loi statistique correspondante, à savoir l'espérance μ et l'écart-type (c'est-à-dire la moyenne de $(x - \mu)^2$) dans le cas de la loi normale.

La démarche de Fisher a consisté à se demander pour chaque échantillon mesuré, ce que ce dernier apporte comme « information » pour connaître ces paramètres. C'est ainsi que Fisher est parvenu en 1925 à quantifier l'information contenue dans un échantillon statistique. Plus tard, il fit lui aussi le rapprochement entre croissance de l'entropie et l'information.

L'ESSENTIEL

Une science de l'information est née dans les années 1940 de travaux réalisés dans trois domaines différents : la physique, la statistique et les télécommunications.

Elle a été appliquée à de nombreuses disciplines, notamment à la biologie où le besoin d'un nouveau cadre d'une refondation de la théorie, se fait aujourd'hui ressentir.

Le concept d'information, par sa généralité apparente, a séduit de nombreux penseurs mais a aussi donné lieu à des interprétations abusives.

ant que, « dans les processus irréversibles présents dans l'estimation statistique, où l'on ne peut pas reconstruire les données d'origine à partir des valeurs estimées, il ne peut y avoir une perte d'information, mais jamais un gain ».

Une troisième voie, enfin, vers une conception scientifique de l'information a été ouverte dans le domaine des télécommunications. Cherchant à augmenter la capacité de transmission des lignes télégraphiques existantes, deux ingénieurs des Laboratoires Bell aux États-Unis, Harry Nyquist puis Ralph Hartley, posent les premiers éléments d'une théorie mathématique de la communication.

Les communications mathématisées

Ainsi, en 1924, Nyquist établit, moyennant certaines hypothèses, que la vitesse de transmission de l'information est proportionnelle au logarithme du nombre S de signaux ou symboles élémentaires utilisés (S est égal à deux dans le cas du code binaire). En 1928,

LE DÉMON DE MAXWELL

Dans l'une de ses formes, le deuxième principe de la thermodynamique stipule qu'il est impossible de faire passer de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud sans apport de travail. Le principe de l'expérience de pensée du physicien écossais James Clerk Maxwell (1831-1879) consiste justement à imaginer un démon capable de

poser à gauche d'un gaz chaud (A) et à droite du même gaz à une température inférieure (B). En termes statistiques, la température correspond à la vitesse moyenne des molécules (plus précisément, la température absolue est proportionnelle à la moyenne du carré de la vitesse des molécules). En 1867,

observation connaît la position et la vitesse de toutes les molécules. Ce petit être ne fait aucun travail, sauf de sélectionner et d'abaisser la porte. » Ce petit être » laisse passer du côté des molécules venant de B qu'il identifie comme étant rapides et, inversement, autorise le passage des molécules lentes de A

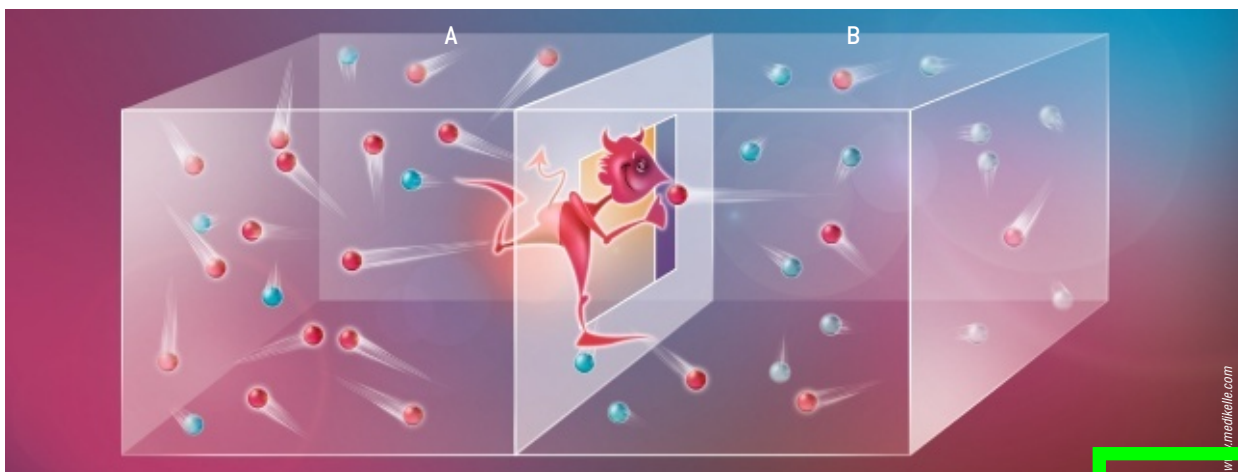
pli. Seule l'intelligence d'un petit être clairvoyant et observateur a été nécessaire. » En 1874, comprenant l'absence de cette expérience, notamment les extensions possibles à la théorie de la diffusion, William Thomson (lord Kelvin) donne naissance à l'expression « démon de Maxwell ». L'ex-

mène aurait lieu. Dans une enceinte séparée en deux par une cloison percée d'une petite porte, on dis-

scientifique écossais, Maxwell précise : « Maintenant, imaginez un petit être qui, par une simple ob-

devenue plus chaude, et l'enceinte froide est devenue plus froide, sans qu'aucun travail n'ait été accom-

Maxwell a joué un rôle central dans ses réflexions sur les liens entre information et entropie.



Hartley définit la quantité d'information contenue dans une suite de N symboles élémentaires comme étant égale à $N \log S$, tout en soulignant que ces considérations sont indépendantes de la nature ou de la signification de l'information véhiculée.

C'est dans le contexte de la Seconde Guerre mondiale que les idées de Nyquist, Hartley et d'autres ingénieurs ou chercheurs convergent vers une « théorie de l'information », essentiellement grâce aux travaux de Shannon, également des Laboratoires Bell.

Ce mathématicien-ingénieur quelque peu excentrique rédige en 1945 *Une théorie mathématique de la cryptographie*, rapport classé secret jusqu'en 1957. Dans ce document, il a l'intuition de comparer les perturbations du signal engendrées par la clef de cryptage au « bruit » qui parasite les lignes de télécommunication.

et que les ingénieurs essayent de minimiser. Shannon y définit en outre la quantité d'information, dans le cas discret, comme la moyenne logarithmique des probabilités de sélection des éléments constitutifs du message. (voir l'encadré ci-dessous).

Parallèlement à ses recherches cryptographiques, Shannon a travaillé à l'automatisation de la défense antiaérienne. De la Première Guerre mondiale à la Seconde, les avions volaient deux fois plus haut et deux fois plus vite. Les opérateurs des radars n'avaient alors pas le temps de communiquer efficacement avec les équipes d'artillerie. Pour transmettre les données automatiquement, il fallait là encore, pour l'équipe de Shannon, trouver un code adapté et définir l'information à transmettre.

Une autre équipe des Laboratoires Bell, dirigée par Norbert Wiener, se pré-

occupait des perturbations dues aux dents des engrenages, qui affectaient la stabilité du bras déterminant l'axe de tir. Assisté de l'ingénieur Julian Bigelow, Wiener eut l'idée de consulter son ami cardiologue, Arturo Rosenblueth, qui avait déjà analysé des mouvements perturbés caractéristiques de certaines formes d'ataxie (difficulté de coordination) dans le tabès, une forme tardive de la syphilis.

De l'information dans les boucles de rétroaction

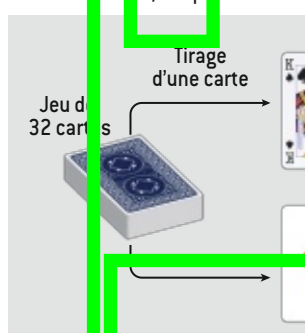
Ces échanges transdisciplinaires, liés à l'effort de guerre des États-Unis, ont conduit à l'élaboration d'une théorie générale de la régulation, que Wiener nomma cybernétique dès 1947. Cette théorie portant sur des systèmes quelconques, que ce soit des machines ou des organismes vivants, était

QUANTITÉ D'INFORMATION, INCERTITUDE, ENTROPIE

Pour définir la quantité d'information contenue dans un message d'une certaine longueur et formé à partir d'un certain alphabet de lettres ou symboles, Claude Shannon a cherché à quantifier l'incertitude ou le choix – ou encore le manque d'information – lié à l'ensemble des messages possibles ayant la même longueur et utilisant le même alphabet.

Supposons que l'on ait N messages possibles et que la probabilité de choisir le i -ème message soit p_i , avec $p_1 + p_2 + \dots + p_N = 1$. Shannon a cherché une fonction $H(p_1, \dots, p_N)$ qui quantifie l'incertitude associée à ces possibilités. En exigeant qu'elle satisfasse à certaines propriétés naturelles, il a prouvé que la fonction H , nommée entropie informationnelle ou entropie statistique, devait être de la forme : $H = -K(p_1 \log p_1 + p_2 \log p_2 + \dots + p_N \log p_N)$, où K est une constante positive arbitraire. Quand un seul choix est possible (ous les p_i sont nuls, sauf un), l'incertitude est nulle ; l'information apportée en spécifiant ce choix est donc elle aussi nulle. Dans le cas où les probabilités sont toutes égales ($\frac{1}{N}$), on a $H = K \log N$; cela correspond à une incertitude maximale, et l'information apportée en spécifiant le choix effectué est maximale.

Un exemple très simple est celui d'un message constitué d'un seul symbole binaire, généralement noté 0 ou 1. Il y a deux choix possibles ; si les deux sont même probabilité ($p_1 = p_2 = \frac{1}{2}$), l'entropie de Shannon devient $H = K \log 2$. Par commodité, on choisit $K = 1/\log 2$, ce qui définit l'entropie en bits (logarithme de base 2) ; l'entropie de Shannon d'un symbole binaire est donc $H = 1$ bit. Si la probabilité de l'un des deux choix est supérieure au valeur $\frac{1}{2}$, l'entropie est inférieure à 1 bit.



bit d'information (le terme « bit », contraction de *binary digit*, a été proposé par le statisticien américain John V. Neyman). De la même façon, l'affirmation « Mon rendez-vous est le matin » apporte une information d'un bit d'alternative élémentaire, s'il est également probable que ce rendez-

Autre exemple : l'annonce de la carte que l'on a choisie dans un jeu de 32 cartes. Les choix pos-

sibles ayant la même probabilité, $1/32$, l'entropie de Shannon est égale à $\log_2 32$, c'est-à-dire cinq bits (puisque $2^5 = 32$). La quantité d'information apportée par cette annonce correspond au nombre de questions à réponse binaire (« oui » ou « non ») nécessaires pour trouver la carte : « Est-elle de couleur rouge ? », « Est-elle égale ou supérieure au valet ? », etc.

Shannon a aussi montré qu'on pouvait coder l'« entropie » d'une langue à partir d'un calcul sur sa redondance. En des phrases restent compréhensibles lorsque des lettres sont enlées ; c'est le principe des techniques de sténographie et à titre d'exemple sans vouloir flatter les lecteurs, on peut dire que la phrase « Lgnts cmprnnnt fclmnt n txt sns vlls. » En même temps, Shannon a toujours tenu à préciser que la dimension

sémantique de l'information était absente de ses travaux. Que ce soit à travers la définition statistique ou par l'utilisation de la redondance, l'ingénieur en télécommunications aura la même difficulté à mettre un mot en déclaration de guerre, des courses ou un message dépourvu de sens pour lui.

La formule de l'entropie au sens de Shannon, $H = -K \sum p_i \log p_i$, ressemble beaucoup à la formule qui définit l'entropie en mécanique statistique, telle qu'elle a été établie par les physiciens Ludwig Boltzmann et Josiah Gibbs au XIX^e siècle. Il suffit d'adopter les logarithmes népériens et de prendre pour K la constante de Boltzmann ($k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ joule/kelvin) pour obtenir une expression formellement identique, p_i désignant alors la probabilité du i -ème état microscopique accessible au système physique considéré. Toutefois, l'identification entre l'entropie/information de Shannon et l'entropie de Boltzmann-Gibbs a été contestée par de nombreux scientifiques ; le physicien et bio-informaticien américain Hubert Yockey, notamment, a souligné

les deux situations ne sont pas isomorphes (leur correspondance n'est pas rigoureuse).

centrée sur la notion de « boucle de rétroaction » (*feedback* en anglais). Le thermostat est l'archétype d'un dispositif réalisant une telle régulation : il mesure la température et, en fonction du résultat, modifie son fonctionnement dans un sens ou dans un autre afin d'atteindre ou maintenir la température souhaitée.

Après la guerre, de 1946 à 1953, une dizaine de conférences interdisciplinaires, organisées avec le soutien de la Fondation Macy, ont permis à Wiener et d'autres scientifiques de classer ces phénomènes de rétroaction et d'y souligner le rôle clef de l'information – celle-ci étant définie par Wiener de façon similaire à l'information de Shannon, avec la même analogie par rapport à l'entropie statistique.

Les boucles de rétroaction permettent de déclencher automatiquement un système de régulation par action de mécanismes agissant dans le sens opposé à celui ayant causé un écart avec l'objectif désiré. Ces phénomènes étaient connus depuis longtemps (par exemple en mécanique pour les machines à vapeur ou en biologie pour la régulation de la température ou de la pression sanguine). Mais en considérant que c'était de l'information qui circulait dans ces boucles, les cybernéticiens ont pu construire une théorie abstraite des systèmes de régulation.

Parmi les scientifiques impliqués dans ces réflexions théoriques, voire philosophiques, figuraient bien entendu Shannon, mais aussi d'autres célébrités – des physiciens et mathématiciens comme John von Neumann, des biologistes comme Max Delbrück (l'un des pères de la biologie moléculaire), ou encore des anthropologues comme Margaret Mead ou Gregory Bateson.

Les fondements mêmes de plusieurs disciplines scientifiques furent réinterprétés à l'aune de la théorie de l'information et de la cybernétique. Dans le domaine des techniques, l'application de la théorie de l'information à la Shannon a eu de nombreuses retombées. Il suffit de penser aux codes correcteurs d'erreurs, utilisés aujourd'hui universellement pour protéger l'information numérique contre sa dégradation, aux techniques de compression de données, etc. Dans l'exemple de la compression de données, les travaux de Shannon et de ses continuateurs ont permis de conceptualiser la redondance : ainsi, pour coder numériquement une image montrant une partie de ciel bleu

uniforme au lieu de coder chaque pixel (ordonnés du pixel, valeur de la couleur), un code généré par un algorithme de type JPEG utilisera une syntaxe permettant de traduire en langage informatique « de tel pixel à tel autre, afficher telle valeur de bleu ».

Au-delà des services rendus aux technologies de la communication, ce qui était le cadre originel de la théorie de l'information codifiée par Shannon et son école, beaucoup de scientifiques ont été tentés de voir dans l'information une entité fondamentale, intervenant dans tous les domaines du savoir.

Matière, espace, temps et information : les nouveaux éléments ?

Il y a une vingtaine d'années déjà, Rolf Landauer (1927-1999), physicien chez IBM aux États-Unis, affirmait que « l'information est physique » et qu'elle doit avoir la même place, dans l'analyse du monde qui nous entoure, que la matière, l'énergie, l'espace et le temps. De même, en France, le physicien des hautes énergies Gilles Cohen-Tannoudji proposait d'introduire une quatrième constante fondamentale, une constante « informationnelle » (combinant la constante de Boltzmann et celle de Planck, ayant le même statut que la vitesse de la lumière c , la constante de gravitation G et la constante de Planck h pour rendre compte de l'importance de la notion d'information en physique théorique.

Une vision encore plus radicale est prônée par le physicien d'origine serbe Vlatko Vedral, qui travaille aux Universités d'Oxford et de Singapour et dont les recherches portent sur l'information quantique (un domaine actif de la physique moderne, où l'on cherche à exploiter les phénomènes quantiques pour mieux stocker, traiter, coder ou crypter l'information). Pour ce physicien, tout est information, et c'est cette notion, et non l'énergie, la matière, l'espace ou le temps, qui devrait apporter la clef de la compréhension de l'Univers. Dans cette conception, l'Univers équivaut à une sorte de gigantesque ordinateur.

Du côté de la biologie, la théorie de l'information a également marqué les esprits. Dans les années 1950, elle avait apporté un langage commun aux biologistes dans leurs recherches pour établir le « code » génétique, après la découverte

L'AUTEUR



Jérôme SEGAL est maître de conférences à l'Université Paris IV Sorbonne, actuellement en disponibilité à Vienne où

il coordonne le Collège doctoral d'histoire et philosophie des sciences de l'Université de Vienne.

BIBLIOGRAPHIE

F. Conway et J. Siegelman, *Héros pathétiques de l'âge de l'information*, Paris, Éditions de Norbert Wiener, père de la cybernétique, Hermann, 2012.

J. Segal, *Le zéro et le un*, Matériologiques (édition électronique, www.materiologiques.com), octobre 2011.

P. M. Binder, *Quantum demons : information and order in biology*, *MBQ Reports*, vol. 12(6), p. 495-499, 2011.

V. Vedral, *Quantum information – The Universe as Quantum Information*, Oxford University Press, 2011.

M. Triclot, *La constitution de la notion d'information*, Champ-Vallons, 2000.

G. Cohen-Tannoudji, *Les constantes universelles*, Hachette, 1996.

H. Yockey, *Information Theory and Molecular Biology*, Cambridge University Press, 1992.

de la structure en double hélice de l'ADN, en 1953. Peu après, c'étaient les idées issues de la cybernétique sur l'auto-organisation qu'avaient reprises de nombreux biologistes pour expliquer le vivant.

Aujourd'hui, avec l'émergence de la biologie de synthèse, où les chercheurs modifient profondément des cellules vivantes, on assiste à un nouveau souffle de la théorie de l'information et à de nouveaux questionnements. Pour mieux comprendre comment fonctionne une cellule vivante, des biologistes comme Antoine Danchin, instigateur de la génomique bactérienne en France et fondateur de la Société AMAbiotics, pensent qu'il faut voir les organismes vivants comme des systèmes qui recueillent de l'information et l'utilisent, l'information étant ici définie de façon plus large comme une quantité qui est transférée (sans nécessairement être conservée) au cours d'un processus de mesure, des corrélations étant créées entre le système mesuré et le système qui effectue la mesure.

Selon Danchin, il faut de nouveau faire appel à des démons de Maxwell : dans une cellule, de telles entités (des molécules ou des complexes moléculaires)

recueilleraient de l'information pour corriger les effets du vieillissement et permettre à la cellule de se reproduire. Par exemple, la cellule contiendrait des démon moléculaires capables de distinguer entre protéines normales et protéines dysfonctionnelles, et capables d'éliminer ces dernières (voir la figure 3).

Effacer de l'information coûte de l'énergie

De telles considérations remettent en avant des travaux de Landauer effectués dans les années 1960 sur le coût, en termes d'entropie, lié à l'effacement de l'information. Car en recueillant de l'information, le démon de Maxwell biologique doit changer d'état, et pour fonctionner à nouveau, son état doit être réinitialisé. Or cela implique un coût en entropie, associé à un coût en énergie. En effet, Landauer avait montré que des opérations logiques réversibles telles que l'opération NON (qui inverse la valeur d'un bit d'information, transformant 0 en 1 ou 1 en 0) peuvent

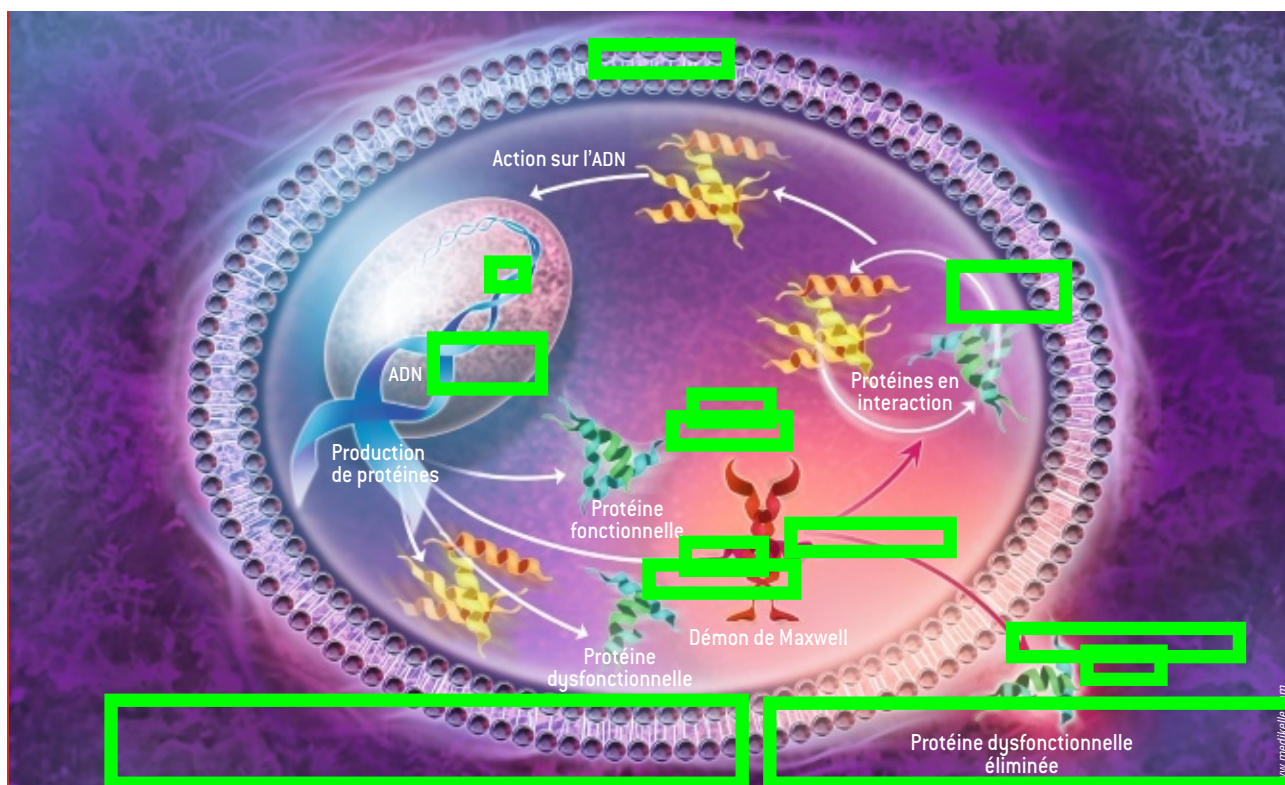
se dérouler sans consommer d'énergie ; il avait aussi montré qu'en revanche, une opération irréversible telle que l'efface-

ment exige un minimum d'énergie : il faut une énergie au moins égale à $k_B T \ln 2$ pour chaque bit d'information perdu, où T est la température absolue.

Cette consommation d'énergie pourrait, selon A. Danchin, aider à identifier les démons de Maxwell cellulaires. S'ils existent, explique-t-il, ils doivent être codés par le génome, et plus particulièrement par le « palmarès », un ensemble de gènes qui codent des fonctions essentielles à la vie. Or les biologistes ont constaté que certaines de ces fonctions, censées être impliquées dans la maintenance de la cellule, utilisent de l'énergie d'une façon qui ne leur correspond pas clairement. Autrement dit, une énergie dépensée de façon inattendue pourrait trahir un démon de Maxwell cellulaire.

Une telle dépense suspecte d'énergie pourrait être en jeu dans un mécanisme de vérification de la traduction des ARN en protéines identifié dans les années 1970. Cela étend d'autres pistes existent pour identifier les démons de Maxwell cellulaires. Par exemple, une famille de protéines nommées sentines semble impliquée

dans le confinement de vieilles protéines dans des cellules de levure, ces vieilles protéines restant au sein de la cellule mère



3. LE FONCTIONNEMENT DU VIVANT met en œuvre des processus opérant de façon analogue à un démon de Maxwell. Ainsi, une cellule produit grâce à son ADN de nombreuses protéines, dont certaines sont défectueuses et à éliminer. Un « démon de Maxwell » moléculaire, lui-même produit par l'ADN cellulaire, effectuerait ce tri. Les entités moléculaires qui jouent le rôle de démons de Maxwell restent toutefois à identifier.

Théorie de l'information, cybernétique : dérives et abus

Dès le début du développement de la théorie de l'information, et malgré le caractère incomplet et hétéroclite de celle-ci (ou peut-être grâce à lui), elle a suscité de nombreuses motivations avant tout idéologiques ont tenté de tirer profit de cette possible unification.

Lors des conférences de la fondation MacArthur, en 1949, c'est le fondateur de l'Église de la scientologie, Ron Hubbard, qui approche Shannon pour s'immiscer dans le groupe des scientifiques. Il entretient ensuite sciemment une confusion entre *Cybernétique*, le titre de son livre-testament, et la cybernétique. Sans doute parce que cette unité du savoir n'était pas revendiquée par une institution forte et suffisamment établie.

En effet, au sein même de ce milieu, des sectes ont voulu utiliser la théorie de l'information pour leur propre promotion.

En 1971, lorsque de prestigieux physiciens, chimistes et biologistes se sont réunis officiellement pour échanger autour du thème « La science et les valeurs absolues », il n'était question que de la notion scientifique d'information, et le riche mécène qui avait invité les 11 lauréats du prix Nobel n'était autre que le révérend Sun Myung Moon, présenté comme le responsable de « l'Église de l'unification », que d'aucuns qualifient – non sans raison – de secte Moon. Des scientifiques tels que Eugene Wigner, Ilya Prigogine ou John Carew Eccles y ont surtout servi de caution scientifique à la secte, même si Eccles, dans son allocution d'ouverture, a cité Moon selon qui le sens de cette unification est à chercher dans « l'information ».

Les propos tenus par d'autres scientifiques, tel le biologiste Gunther Stent, témoignent clairement

d'une fétichisation de la notion d'information cybernétique. Pour Stent, par exemple, « transmettre par des signaux radio est équivalent à transmettre le contenu d'un message extraterrestre est équivalent à transmettre le contenu de son âme ».

Une vingtaine d'années plus tard, au printemps 1997, à l'occasion de l'émoi que provoqua l'annonce de la naissance (un an auparavant) du clone d'un rebis adulte, la secte des raëliens publia plus en avant encore ces élucubrations, annonçant que « la prochaine étape sera le transfert d'information de la personnalité d'un individu vivant à un autre ».

L'information, et plus précisément la partie liée à la cybernétique, a pu porter un ersatz de religion. En reprenant

un exemple, la cybernétique était d'abord bannie, considérée comme une théorie « démodée » (ce qui suffisait déjà, en période de guerre froide, pour la discréditer), mais elle est revenue à l'origine de l'automatisation, et donc du remplacement des valeureux ouvriers par des robots.

À partir du moment où, au début des années 1950, les militaires soviétiques ont pu faire comprendre aux apparatchiks qu'il était nécessaire pour la défense du pays d'ouvrir des centres de recherche spécialisés sur ces questions, la cybernétique a été créée comme une incarnation du matérialisme dialectique, et même sa justification scientifique. En 1992, le philosophe allemand

qui « la cybernétique avait été pendant un temps un substitut de religion pour les fonctionnaires ».

et ne passant pas aux cellules filles ; les septines seraient ainsi de possibles démons de Maxwell pour la cellule.

Identifier les démons de Maxwell à l'œuvre dans les cellules vivantes, déterminer comment ils fonctionnent exactement, etc., est donc pour A. Danchin et d'autres biologistes un enjeu majeur. Plus largement, l'étude de ces questions pourrait faire progresser la théorie de l'information, qui reste imparfaite : on ignore par exemple si l'information doit obéir à un principe de conservation analogue à celui de la conservation de l'énergie, et la théorie de Shannon ne traite pas de l'information en elle-même mais plutôt de sa transmission, sans se préoccuper de sa signification.

Il y a un côté fascinant à considérer qu'une unité du savoir pourrait se forger autour du concept d'information. Cette perspective a parfois entraîné des dérives et des interprétations abusives (voir l'encadré ci-dessous). Mais des liens plus sérieux entre domaines différents se sont aussi établis autour du concept d'information. On peut citer l'exemple du structuralisme, né en grande partie de la rencontre, à New York, dans les années 1940, entre le linguiste russe Roman Jakobson et l'anthropologue français Claude Lévi-Strauss. Or leur langage commun, ce qui justifiait

même leurs échanges, était la définition de la notion d'information. À cette époque et jusqu'à la fin des années 1960, il était question d'une unité du savoir autour des sciences du langage.

Une théorie qui a encore de beaux jours devant elle

Dans un deuxième temps, avec le développement de ce qu'on a appelé (peut-être un peu abusivement) la « deuxième cybernétique » (ou cybernétique de deuxième ordre) – selon laquelle des systèmes auto-régulés peuvent créer de l'ordre (on parle d'autopoïèse) –, la théorie de l'information a connu des applications importantes dans la conception des systèmes économiques. Le marché devait dès lors s'auto-réguler sans intervention de l'État, et des penseurs économistes tels que l'Autrichien Friedrich Hayek ont cru pouvoir justifier scientifiquement, sur cette base, une conception libérale de l'économie. Étendue ensuite à des domaines a priori non marchands, cette conception a donné naissance au « néolibéralisme » tel qu'il fut défini et surtout promu par l'École de Chicago.

Toutefois, c'est dans les domaines plus strictement scientifiques et techniques que le concept d'information s'est révélé le plus fécond et le plus pertinent. Nous en avons mentionné quelques exemples, avec notamment le démon de Maxwell en physique théorique. On peut aussi citer l'astrophysique des trous noirs, où le sort de l'information ou de l'entropie engloutie avec la matière reste une question stimulante et non résolue. Quant aux applications concrètes, elles sont innombrables, qu'elles relèvent des télécommunications ou de l'informatique.

Quoi qu'il en soit, les recherches liées à l'information quantique commencent à porter leurs premiers fruits technologiques. L'entreprise *ID Quantique*, par exemple, jeune pousse de l'Université de Genève, en Suisse, a déjà pu prendre en charge, à l'aide d'un procédé de cryptage quantique, une partie des communications cryptées liées à la Coupe du monde de football ; à Vienne, en Autriche, l'équipe rassemblée autour d'Anton Zeilinger est parvenue à battre le record de distance pour une transmission (sur plus de 140 kilomètres) à partir de photons dont les états quantiques étaient intriqués. La théorie de l'information a aujourd'hui 65 ans, mais, comme la plupart des sciences, elle a encore de beaux jours devant elle. ■

UNE NOUVELLE VIE pour l'ADN ancien

Kevin Campbell et Michael Hofreiter

Les scientifiques résolvent des énigmes physiologiques de la paléontologie en reconstituant, à partir de fragments d'ADN, les protéines d'espèces disparues, tel le mammouth.

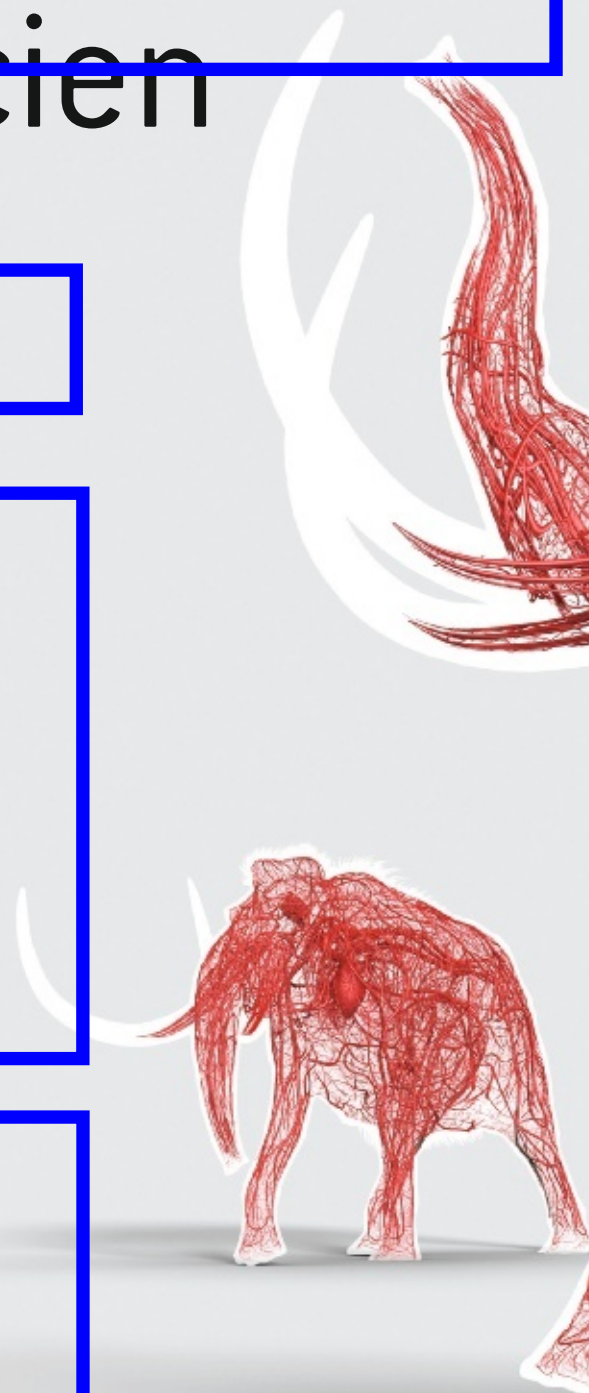
Pendant plus de 150 ans, les paléontologues ont reconstitué les vertébrés des temps passés à partir d'os et de dents fossilisés. Les squelettes révèlent la taille et l'apparence de ces animaux disparus, les empreintes des muscles sur les os indiquent s'ils étaient robustes et comment ils se déplaçaient; la forme et l'usure de leurs dents témoignent du type de nourriture qu'ils ingéraient. Bref, ces restes pétrifiés ont constitué une mine d'or pour les scientifiques. En de rares occasions, des animaux momifiés ou des cadavres congelés particulièrement bien conservés ont apporté de précieux renseignements supplémentaires tels que l'épaisseur du pelage, la forme des oreilles ou le menu du dernier repas. Toutefois, malgré toutes les informations recueillies sur les caractéristiques physiques de ces animaux, on ne connaît presque rien des processus physiologiques sous-jacents.

Pour l'instant. Car grâce aux avancées récentes des biotechnologies, les biologistes reconstituent des gènes anciens à partir d'animaux disparus. Introduits et exprimés dans des bactéries, ces gènes conduisent à la synthèse des protéines qu'ils codent – des protéines qui, au sein des animaux disparus, participaient au fonctionnement de leurs cellules. Une nouvelle discipline

s'est ainsi ouverte aux paléontologues : la paléophysiologie ou l'étude du fonctionnement des organes et des tissus d'organismes disparus. Nous n'en sommes qu'aux prémices, mais nous avons déjà obtenu des indications étonnantes sur la façon dont l'un des mammifères emblématiques de la Préhistoire, le mammouth laineux, s'est adapté aux rudes conditions de son époque glaciaire. Si le clonage d'animaux préhistoriques relève de la science-fiction, nos recherches montrent qu'il est possible d'accéder aux processus physiologiques qui régissaient la vie d'organismes ayant depuis longtemps disparu de la surface de la Terre.

Étudier la physiologie du mammouth

Tout a commencé un soir de 2001. L'un d'entre nous, Kevin Campbell, regardait une émission télévisée sur l'exhumation des restes d'un mammouth laineux retrouvés dans le pergélisol sibérien. S'appuyant sur le récent clonage de la brebis Dolly (en 1997), les invités de l'émission avançaient – à tort comme on verra la suite – que grâce à l'ADN de ce mammouth, les scientifiques ramèneraient bientôt de tels géants à la vie. La vision de K. Campbell était quant à elle plus ciblée



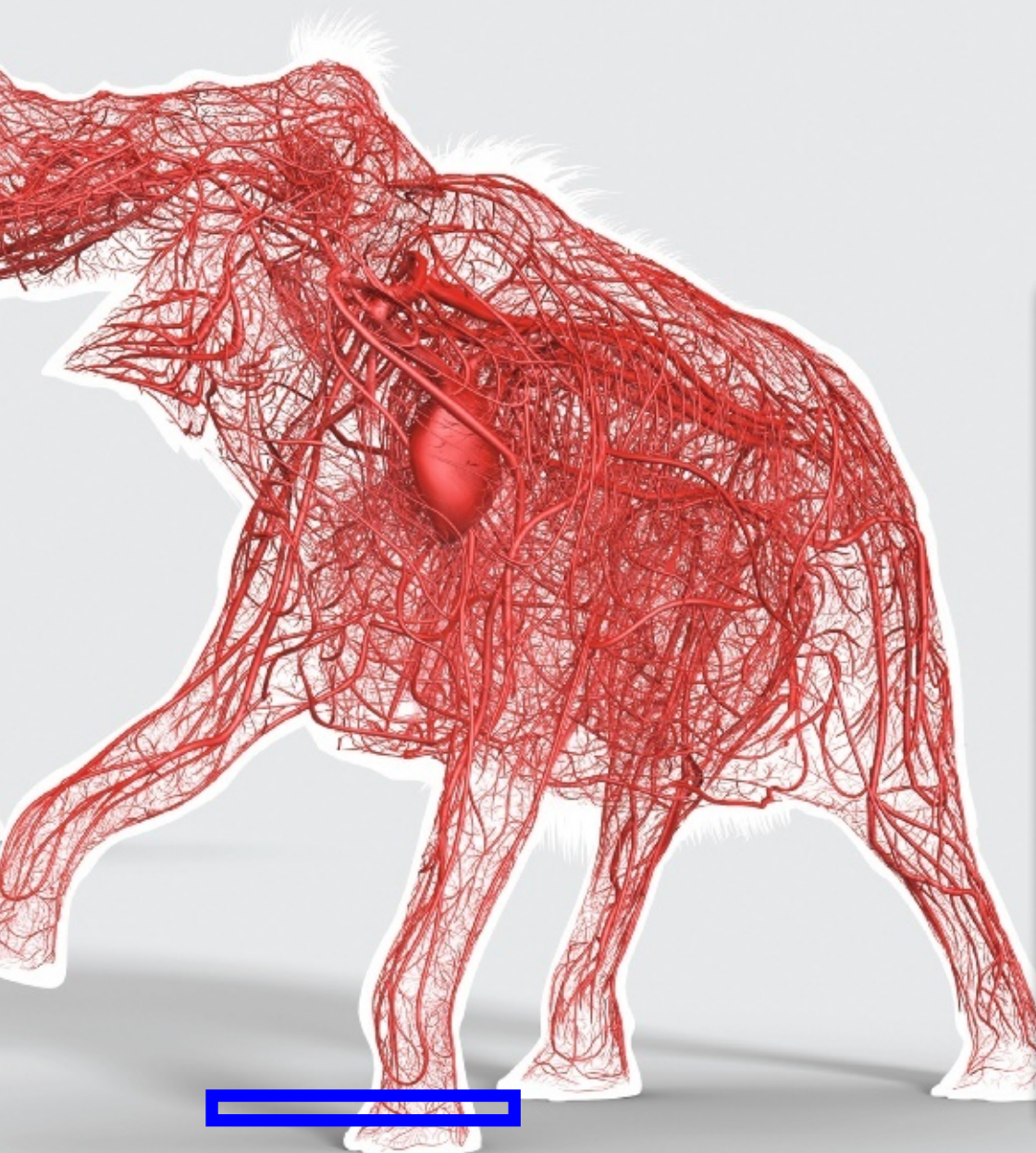
et bien plus accessible que cette entreprise colossale. Son ambition était de découvrir comment les lointains ancêtres des éléphants d'Asie s'étaient adaptés au climat froid des hautes latitudes où ils vivaient.

Les archives fossiles indiquent que les ancêtres du mammouth laineux sont originaires des plaines africaines subtropicales et n'ont migré en Sibérie qu'il y a un peu moins de deux millions d'années, alors que la Terre venait d'entrer dans une des périodes les plus froides de son histoire : les glaciations du Pléistocène. Comme c'est encore le cas aujourd'hui pour les éléphants d'Afrique, éviter une surchauffe était le plus grand défi physiologique de l'ancêtre du mammouth tant qu'il résidait sur sa terre

d'origine. Mais lorsqu'il a migré vers le Nord, c'est la planète a commencé à se refroidir, à conserver sa chaleur corporelle est devenu primordial.

Tout ce que nous savions, ou presque, sur la biologie des espèces éteintes avait été dédié à l'étude minutieuse des fossiles et aux restes congelés ou momifiés. Les discussions autour de l'adaptation au froid du mammouth se limitaient donc aux caractéristiques physiques observables sur les carcasses mises au jour, telle l'épaisse toison de laine qui les recouvrait. Mais les caractéristiques physiques ne constituent qu'une partie de l'histoire. Un ensemble de processus physiologiques a vraisemblablement aussi joué un rôle essentiel

dans la survie des mammouths au froid. Malheureusement, ces processus ne laissent aucune trace dans les archives fossiles. Notre seul espoir de les étudier était de retrouver les fragments d'ADN dans de telles archives, de reconstituer les gènes du mammouth, et de les introduire dans des cellules vivantes pour qu'elles synthétisent les protéines codées – avec, parmi elles, celles qui jadis ont contrôlé ces processus. En comparant le fonctionnement des protéines d'animaux disparus avec celui des protéines produites par leurs lointains parents toujours en vie, nous pourrions alors décrire les mécanismes moléculaires qui ont permis l'adaptation des mammouths au froid.



L'ESSENTIEL

- Longtemps, l'étude des espèces animales disparues reposait sur l'analyse de leurs os et dents fossilisés.
- Depuis quelques dizaines d'années, cependant, grâce aux avancées des biotechnologies, les paléogénéticiens reconstituent les gènes de ces animaux éteints et étudient les protéines qu'ils codent.
- Ainsi, on comprend mieux, par exemple, quels processus physiologiques ont permis à un mammouth de s'adapter au grand froid.
- Cette nouvelle discipline est nommée la paléophysiologie.

Bryan Christie

Or, si cette technique paraissait plus simple que de ressusciter l'espèce disparue, elle nécessitait de nombreuses manipulations biotechnologiques des plus délicates. Par chance, plusieurs avancées majeures dans l'étude de l'ADN ancien ont rendu l'objectif accessible.

Même dans des circonstances exceptionnelles, l'ADN de spécimens morts depuis longtemps ne subsiste qu'en infimes quantités ; il est de plus fragmenté et endommagé. Les cellules d'un organisme vivant contiennent deux sortes d'ADN : des boucles d'ADN simples localisées dans les organites qui produisent l'énergie de la cellule, les mitochondries, et de l'ADN organisé de façon beaucoup plus complexe dans le noyau de la cellule.

Les premières études sur l'ADN ancien se sont concentrées sur l'ADN mitochondrial, bien plus abondant que l'ADN nucléaire. Chaque cellule comporte des centaines de mitochondries, mais un seul noyau. Cependant, l'ADN mitochondrial ne représente qu'une infime partie du matériel génétique contenu dans une cellule. Il ne code qu'une poignée de protéines, toutes utilisées uniquement dans la mitochondrie. L'essentiel du code génétique est contenu dans l'ADN nucléaire.

Au départ, les scientifiques ont pensé qu'il était impossible de retrouver suffisamment d'ADN nucléaire ancien pour l'étudier. Pourtant, en 1998, Adam Greenwood

et ses collègues, actuellement à l'Institut Leibniz pour la recherche zoologique sur la vie sauvage, à Berlin en Allemagne, ont rapporté que, dans des restes issus du pergélisol, de petits fragments d'ADN nucléaire pouvaient subsister pendant des dizaines de milliers d'années en quantité suffisante pour être analysés.

A. Greenwood et son équipe avaient montré qu'il était possible d'obtenir de minuscules séquences d'ADN nucléaire – des fragments contenant moins de 70 nucléotides (les « lettres » du code génétique) – à partir d'organismes aussi anciens que le mammouth laineux. Mais on était encore loin de pouvoir séquencer les centaines ou milliers de nucléotides qui composent un gène complet. De plus, l'approche d'A. Greenwood nécessitait la destruction de grandes quantités d'ADN ancien obtenu au prix d'efforts considérables.

Un pelage blond code dans le génome

Or à la fin d'une technique utilisée en biologie moléculaire pour créer de multiples copies de fragments d'ADN à partir d'organismes existants, la PCR en multiplex, l'un d'entre eux (Michael Hofreiter) a levé l'obstacle majeur à l'étude de la physiologie des animaux disparus. Pour montrer l'intérêt de la méthode, son équipe a assemblé en 2005 le premier génome d'ADN mitochondrial

complet (une séquence de 16 500 nucléotides) à partir d'une espèce datant des glaciations : le mammouth laineux.

Ayant affiné sa technique de séquençage de l'ADN ancien, l'équipe de M. Hofreiter, alors à Jena en Allemagne, l'a utilisée pour reconstruire le premier gène nucléaire complet à partir d'une espèce éteinte. Là encore, la source d'ADN était un mammouth – plus précisément le fémur fort bien conservé d'un spécimen vieux de 43 000 ans retrouvé dans une rivière de Sibérie. Les chercheurs ont sélectionné le gène *MC1R* (ce gène code le récepteur de la mélanocortine de type 1, qui intervient dans la coloration des plumes d'oiseaux et des poils de mammifères). L'intérêt de *MC1R* est que sa séquence est courte et que son activité est facile à analyser dans un tube à essai ; les biologistes peuvent ainsi relier les séquences d'ADN à des caractéristiques observables.

Les poils retrouvés sur les restes de mammouths conservés dans le pergélisol étant tantôt clairs, tantôt foncés, M. Hofreiter et ses collaborateurs ont émis l'hypothèse que ces deux couleurs de pelage étaient dues non pas à leur exposition, durant des dizaines de milliers d'années, à des facteurs chimiques présents dans les sédiments, mais à des fonctionnements différents des gènes. Le séquençage de l'ensemble des 1 236 nucléotides qui composent le gène *MC1R* complet a permis de découvrir deux variants distincts du gène – ou allèles. Le premier

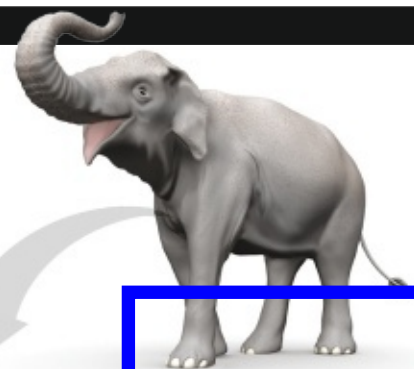
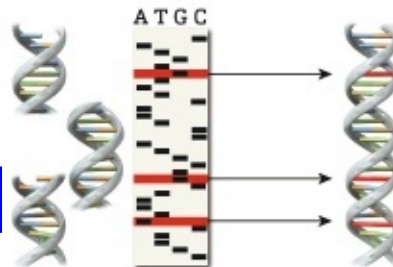
REDONNER VIE AUX MAMMOUTHS

En reconstituant des gènes anciens, les scientifiques recréent les protéines qu'ils codent et observent comment elles se comportent, offrant un éclairage sur la physiologie d'animaux disparus.

Ainsi, la reconstitution de l'hémoglobine du mammouth, une protéine des globules rouges qui transporte l'oxygène dans le sang, a révélé des adaptations évolutives qui ont facilité le fonctionnement de la protéine – sensible à la température – dans un climat très froid.



1 À partir de l'ADN du mammouth, on séquence des fragments de gènes qui codent l'hémoglobine.



2 On reconstitue des gènes d'hémoglobine de mammoth fonctionnels en prélevant les gènes intacts correspondants sur un éléphant d'Asie et en altérant leurs séquences en trois endroits pour qu'elles coïncident avec les séquences du mammoth.

allèle diffère du gène correspondant chez l'éléphant d'Afrique par un seul nucléotide, tandis que dans le second apparaissent trois mutations supplémentaires, qui toutes entraînent les substitutions d'acides aminés (les éléments constitutifs des protéines) dans la protéine codée.

Curieusement, deux de ces substitutions s'étaient produites dans des régions de la protéine qui avaient rarement varié au cours de l'évolution. Il était donc impossible d'évaluer par comparaison avec d'autres mammifères si ces substitutions inhabituelles avaient modifié la couleur de la toison des mammoths. L'analyse fonctionnelle des gènes dans des cellules, toutefois, a montré que l'une des trois mutations du second allèle produit une version moins active du gène de pigmentation. À en juger par l'activité des gènes de pigmentation d'autres mammifères, les biologistes ont conclu que ce variant moins actif contribuait probablement à éclaircir la toison des mammoths qui l'exprimaient.

Par un heureux hasard, Hopi Hoekstra, à l'Université de Californie à San Diego, et ses collègues ont découvert au même moment que le variant du gène *MC1R* de certaines populations de souris des dunes présente la même substitution clé d'acides aminés que celle repérée chez le mammoth dans le second allèle du gène. Mieux, la souris porteuse de ce variant a un pelage

de couleur claire, camouflage naturel qui lui permet de se fondre dans le paysage sablonneux où elle vit.

Pour les mammoths, l'avantage évolutif du pelage clair est moins évident : même blond, comment un tel mastodonte aurait-il pu passer inaperçu dans les vastes plaines dénudées de la Sibérie primitive ? Il est possible, cependant, qu'une toison de couleur pâle ait permis à ces animaux d'avoir plus chaud dans cet environnement froid et battu par les vents, comme c'est le cas aujourd'hui pour les oiseaux et les mammifères peu colorés. Certes, le pelage clair est plutôt connu pour réfléchir les rayons du Soleil. Toutefois, il diffuse une partie du rayonnement vers la peau, où il est absorbé sous forme de chaleur. Au contraire, un pelage foncé absorbe le rayonnement en surface et le dissipe considérablement la chaleur qu'il procure.

Des Néandertaliens roux ?

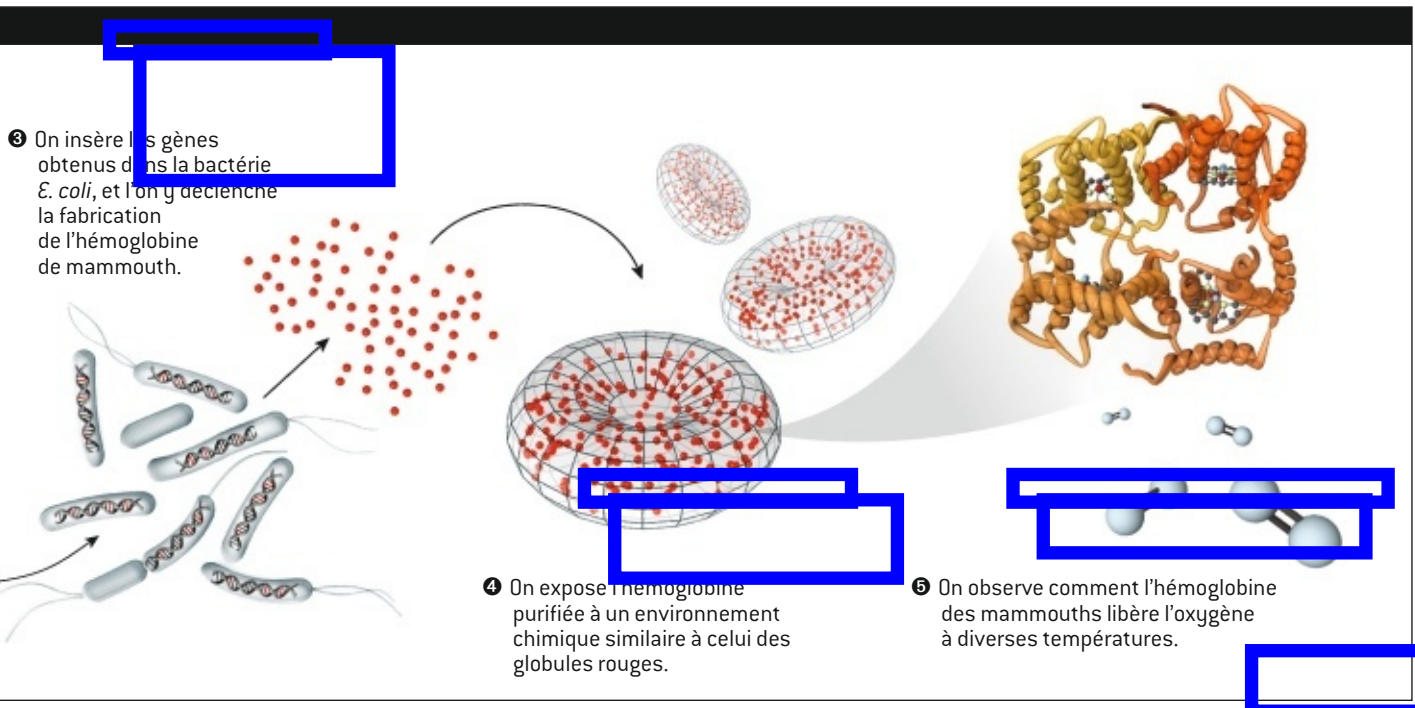
Forte de ces succès, l'équipe de M. Hofreiter s'est intéressée à l'homme de Néandertal, une espèce parente de *Homo sapiens*, qui a vécu en Eurasie et s'est éteint il y a environ 28 000 ans. À partir des restes d'un Néandertalien exhumés à Monti Lessini en Italie, l'équipe a extrait et amplifié un fragment de 128 nucléotides du gène *MC1R* qui code une substitution d'acides aminés

■ LES AUTEURS



Kevin CAMERON est professeur de physiologie à l'Université du Manitoba, au Canada.

Michael HOFREITER est professeur de biologie à l'Université de York, en Angleterre.





d'une grande efficacité. Le sang artériel chaud et oxygéné, qui circule du cœur vers les extrémités, transmet la majeure partie de sa chaleur au sang veineux froid qui retourne vers le cœur. Le gradient thermique résultant de ce processus maintient les extrémités en contact avec des surfaces froides, telle le pied, à une température juste suffisante pour éviter le gel, ce qui réduit les pertes de chaleur. Nul besoin de brûler plus de calories pour réchauffer les extrémités, ce qui confère un avantage certain aux espèces arctiques pendant l'hiver, lorsqu'il est si difficile de se procurer des calories supplémentaires.

Paradoxalement, cette adaptation anatomique prive les extrémités de l'énergie calorifique nécessaire au fonctionnement de l'hémoglobine. Chez les vertébrés, cette protéine des globules rouges se charge de l'oxygène provenant des poumons et le redistribue dans les tissus. Toutefois, rompre la liaison chimique entre l'hémoglobine et l'oxygène requiert de l'énergie (même si la liaison est faible). Aussi la capacité de l'hémoglobine à distribuer l'oxygène diminue-t-elle à mesure que la température baisse.

Une hémoglobine moins sensible au froid

Néanmoins, divers mécanismes procurent aux mammifères habitués au froid une source de chaleur supplémentaire suffisante pour casser la liaison entre l'hémoglobine et l'oxygène. Ces mécanismes (pas encore compris en détail) mettent en jeu la liaison d'autres molécules à l'hémoglobine, au sein des globules rouges. La formation de liaisons chimiques entre ces molécules et l'hémoglobine libère de la chaleur qui participe alors à la libération de l'oxygène.

L'équipe de K. Campbell – qui jusqu'à présent travaillait indépendamment de celle de M. Horvater – a émis l'hypothèse que l'hémoglobine des mammoths avait elle aussi évolué d'une façon qui facilitait la libération de l'oxygène en période de grand froid. Pour savoir si de telles mutations s'étaient produites et pour déterminer leur nature, l'équipe décida de séquencer les gènes de l'hémoglobine du mammoth et de les comparer avec les séquences homologues de l'éléphant d'Asie.

Effectuées en collaboration avec Alan Cooper, de l'Université d'Adélaïde, en Australie, les premières tentatives de séquençage

1. LES CADAVRES BIEN CONSERVÉS, tel ce bébé mammoth vieux de 42 000 ans trouvé en Russie, fournissent une profusion d'informations sur les espèces disparues. Récemment, pour l'ADN peut révéler les processus physiologiques qui sous-tendaient la vie de ces animaux.

■ SUR LE WEB

Explications interactives de la reconstruction de l'hémoglobine de mammoth : ScientificAmerican.com/aug2012/mammoth

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Enk et al., Complete Columbian mammoth mitochondrial genome and interbreeding with woolly mammoth, *Genome Biology*, vol. 12, n° 5, R51, 2011.

K. L. Campbell et al., Substitutions in woolly mammoth hemoglobin confer biochemical and adaptive for cold tolerance, *Nature Genetics*, vol. 42(6), pp. 536-540, 2010.

C. Lalueza-Fox et al., A melanocortin receptor suggests varying pigmentation among Neanderthals, *Science*, vol. 318, pp. 1453-1455, 2007.

J. Krause et al., Multiplex amplification of the mammoth mitochondrial genome and the evolution of Elephantidae, *Nature*, vol. 429, pp. 724-726, 2006.

jamais observée chez l'homme moderne. Comme dans le cas de l'allèle du mammoth, l'analyse fonctionnelle de ce variant montre qu'il est moins actif que la version standard produite par l'homme moderne.

Chez le dernier, on a aussi repéré des variants du gène *MC1R* dont l'activité est réduite de façon similaire : ils proviennent d'êtres humains d'ascendance européenne aux cheveux roux et à la peau claire. Nous en avons déduit que certains Néandertaliens étaient peut-être aussi roux et clairs de peau (bien qu'il s'agisse d'une mutation différente). Sous les hautes latitudes où vivaient les hommes de Neandertal, les rayons ultraviolets nécessaires à la synthèse de la vitamine D sont peu abondants. Une couleur claire de peau a pu favoriser l'absorption de ces rayons, qui pénètrent moins bien les peaux foncées.

Avec ces travaux, nous avons montré qu'il est possible de reconstruire des caractéristiques observables à partir d'ADN ancien. Nous étions prêts à utiliser ce nouvel outil pour appréhender les processus vitaux des espèces éteintes. Et à faire ainsi de la vraie paléophysiologie.

Aujourd'hui, tous les mammifères de grande taille qui se sont adaptés au froid – du renne au bœuf musqué – ont un système d'artères et de veines étroitement associées et antiparallèles, tout au long des membres et de leurs extrémités. Ce *rete mirabile* (réseau admirable) constitue un échangeur de chaleur à contre-courant

des deux gènes de mammoth produisant les chaînes de globine, qui constituent l'ossature de l'hémoglobine, ont échoué. Les échantillons de mammoth disponibles n'étaient pas de qualité suffisante. C'est alors que nous avons uni nos efforts. À partir de l'extrait d'ADN utilisé pour étudier le gène *MC1R*, nous avons obtenu la séquence codante complète des deux gènes d'hémoglobine du mammoth et, par conséquent, les séquences d'acides aminés des deux chaînes de globine.

Le séquençage a révélé que l'une des chaînes de globine du mammoth diffère de celle des éléphants d'Asie en trois acides aminés (sur 146). Ce trio de substitutions d'acides aminés contenait la signature génétique de l'adaptation physiologique au froid ? Un indice chez l'homme appuyait fortement cette hypothèse. Un variant humain rare de l'hémoglobine, nommé hémoglobine Rush, porte l'une des mutations trouvées chez le mammoth. Bien qu'une seule substitution d'acide aminé distingue la protéine Rush de la protéine sanguine standard humaine, cette différence modifie considérablement les propriétés biochimiques de l'hémoglobine : comme pour les animaux adaptés au froid, la sensibilité de la protéine à la température est nettement réduite. L'hémoglobine Rush récupère de l'énergie en se liant à d'autres protéines, ce qui facilite la libération de l'oxygène dans des conditions glaciales.

L'étape suivante consistait à reproduire l'hémoglobine ancienne et l'observer en action. Pour obtenir des copies des deux gènes, nous avons d'abord extrait les gènes d'hémoglobine du sang d'éléphants d'Asie, puis nous y avons introduit les trois mutations repérées dans les séquences des gènes de mammoth. Insérés dans la bactérie *Escherichia coli*, les gènes obtenus ont été traduits en une hémoglobine fonctionnelle, identique à celle qui, il y a 3 000 ans, circulait dans le sang du mammoth qui avait livré son ADN.

Pour la première fois, nous avons la possibilité d'analyser un processus physiologique essentiel d'une espèce éteinte avec la même méthode que si l'animal était encore vivant. Nous avons mesuré la capacité de l'hémoglobine de mammoth, au lieu de celle de l'éléphant, à capter et à libérer l'oxygène à différentes températures physiologiques dans des solutions reproduisant l'environnement chimique interne des globules rouges.

Dans les conditions de grand froid, la protéine de mammoth, comme l'hémoglobine Rush, libérait beaucoup plus facilement l'oxygène que l'hémoglobine de l'éléphant d'Asie (les deux hémoglobines fonctionnaient de la même façon à la température normale du corps, aux alentours de 37 °C). À l'instar de l'hémoglobine des mammifères actuels, l'hémoglobine de mammoth capte d'autres molécules et en retire la source de chaleur supplémentaire nécessaire pour libérer sa charge d'oxygène. Pourtant, cette propriété est survenue à la suite de mutations différentes, a montré la comparaison des séquences génétiques de l'hémoglobine de mammoth avec celles de leurs parents modernes. Le variant humain Rush, quant à lui, ne confère pas

IL EST POSSIBLE DE RECONSTRUIRE des caractéristiques observables à partir de l'ADN ancien.

des caractéristiques observables à partir de l'ADN ancien.

humain Rush, quant à lui, ne confère pas

Du génome du mammoth à son épigénome

Avec le mammoth laineux, nous disposons d'un modèle de choix pour étudier l'évolution des fonctions biologiques chez un organisme éteint. Cette lignée s'est émancipée du milieu subtropical et s'est adaptée à un régime alimentaire ultrasécialisé de brouteur des steppes de plus en plus arides et froides d'Eurasie (et d'Amérique). Ces adaptations écologiques et alimentaires sont traduites par des modifications morphologiques et physiologiques majeures : développement d'une toison laineuse, épaississement de la couche graisseuse du derme, organe de graisse brune à rôle calorifique au niveau de la nuque, modification du fonctionnement rénal, mode de croissance différent, modifications dentaires et squelettiques, etc., permettant de répondre au froid, à une nourriture strictement herbacée et à une faible disponibilité en eau.

En se focalisant sur les mutations présentes dans les séquences codant les protéines, la paléophysiologie n'accède pourtant encore qu'à la partie émer-

gée de l'iceberg. Parmi les millions de mutations qui différencient un mammoth d'un éléphant à l'échelle du génome, seule une infime proportion est responsable de changements dans la séquence d'acides aminés des protéines, l'énorme majorité de ces mutations affectant des séquences non codantes de l'ADN. Il est donc probable que le changement phénotypique des globines des mammoths décrit par la protéine Rush n'est qu'un détail, plutôt qu'une règle. Comment, dans ce cas, expliquer l'extrême différenciation des mammoths ?

La solution résiderait dans les séquences régulatrices de l'expression des gènes qui ne codent pas de protéines, mais influent sur leur expression de façon directe ou indirecte par des réseaux de régulation complexes. Ce sont ces séquences qui sont responsables des différences extrêmes de

formation épigénétique. Toutefois, si l'information contenue dans le génome est de mieux en mieux comprise, celle, plus large, de l'épigénome, qui définit ces réseaux de régulation, est encore aujourd'hui difficilement accessible au sein des restes d'ADN ancien : les manifestations moléculaires de l'épigénome (méthylations de l'ADN, modifications des protéines histones, autour desquelles il s'enroule au sein de la chromatine) ne survivent majoritairement pas dans les restes anciens, les paléogénéticiens sont contraints d'analyser les signatures indirectes de l'épigénome, son « empreinte fossile » dans les molécules d'ADN : par exemple, certaines bases de l'ADN (cytosine) sont plus facilement dégradées quand elles sont méthylées et on recherche ces modifications. La paléogénomique fonctionnelle n'en est donc

prendre l'évolution du mammoth tant dans le temps que dans l'espace. Tandis que certains analysent l'évolution des mammoths laineux via les carcasses gelées de Sibérie et d'Alaska, d'autres s'intéressent au contraire aux autres formes et espèces de mammoths, morphologiquement plus différents, mais dont l'ADN demeure beaucoup plus difficile d'accès, car non préservé par le froid. C'est notamment le cas du mammoth découvert récemment en France à Châtigny-Marne (voir la figure 2), un des trois spécimens presque complets connus à ce jour sur notre territoire. Des prélèvements ont été réalisés dès le dégorgement du squelette et ces restes sont actuellement en cours d'analyse au Muséum national d'Histoire naturelle afin de déterminer si son ADN a été préservé.

Régis Debruyne

Paléogénéticien UMS 2700 Outils et méthodes de la systématique intégrative, Département systématique et évolution, MNHN, Paris



Denis Glikson

2. IL Y A QUELQUES MOIS, LE SQUELETTE presque complet d'un mammoth a été mis au jour à Changis-sur-Marne par l'équipe de Gregory Bayle de l'INRAP. Un fragment de silex découvert en contact direct d'un fragment du crâne du mammoth (zoom) suggère une intervention humaine sur la carcasse de l'animal. Les paléophysiologistes du Muséum national d'histoire naturelle analysent les ossements dans l'espoir d'y détecter de l'ADN préserve. Le mammoth aurait vécu il y a au moins 130 000 ans.

d'avantage adaptatif au froid. La mutation déstabilise la protéine, de sorte que ceux qui la portent souffrent d'anémie chronique. Pourquoi une telle conséquence chez l'homme ? Cette question reste à éclaircir.

Comparer des populations d'une même espèce

L'adaptation de l'hémoglobine n'est qu'une pièce du puzzle. Pour comprendre comment le mammoth laineux s'est adapté au grand froid, bien d'autres aspects de son adaptation biochimique sont encore à élucider. Sans compter que l'énigme se pose pour des dizaines d'autres espèces éteintes. Toutefois, il est peu probable que l'énorme quantité de génomes anciens séquencés ces dernières années soient d'une grande aide : la technique utilisée pour les obtenir, dite de séquençage aléatoire global, produit un échantillonage au hasard qui, s'il fournit un tableau d'ensemble, n'est en général pas assez précis pour une utilisation en paléophysiologie. Seul un tel séquençage

répété de multiples fois serait exploitable, mais le coût en serait exorbitant.

Une nouvelle technique de séquençage, nommée capture sélective par hybridation, permet une meilleure couverture des gènes cibles pour un coût bien moindre : des fragments d'ADN sont capturés spécifiquement par des séquences de nucléotides disposées sur une micropuce – des morceaux de séquence des gènes cibles bien conservés d'une espèce à l'autre, par exemple. Cette technique devrait permettre des études à grande échelle comparant, par exemple, les réseaux de gènes des mammoths de Sibérie, ayant vécu à des périodes interglaciaires plus douces, et ceux de mammoths qui vivaient durant des pics glaciaires, lorsque les glaciers avaient atteint leur épaisseur maximale. On devrait aussi pouvoir comparer des populations d'une même espèce séparées géographiquement, tels les mammoths de Sibérie et ceux d'Amérique (mammoth dit de Columbe). Ce type d'étude non seu-

lement permettrait d'évaluer la diversité génétique au sein d'une espèce, mais fournirait aussi de précieuses informations sur

les nouvelles adaptations physiologiques en réponse aux conditions géographiques et climatiques locales.

Aussi exaltantes que soient ces perspectives (imaginez 50 000 ans d'évolution défilant sous vos yeux), notre capacité à analyser la physiologie des organismes du passé est limitée. Dans l'idéal, les protéines éteintes devraient être étudiées *in vivo*, car nombre de leurs propriétés ne sont perceptibles que dans un organisme vivant. Or, il est peu probable que cela soit réalisable à court terme : il faudrait pour cela faire revivre une espèce éteinte.

Pour l'instant, nous devons nous contenter d'observer des protéines anciennes dans des tubes à essai et des cellules en culture. Déjà, nous utilisons ces techniques pour explorer la physiologie d'autres créatures disparues dont le mastodonte et la rhytine de Steller, un mammifère marin arctique connu aussi sous le nom de vache des mers. Le clonage de ces animaux restera un fantasme pour longtemps encore. En

attendant, protéine par protéine, nous continuerons à insuffler la vie, par petites touches, à ces animaux disparus. ■

8^e

SALON

du livre d'histoire
des sciences et
des techniques

EXPOSITION

ATELIERS

RENCONTRES

TABLES-RONDES

SPECTACLES

LIBRAIRIE

L'ÉNERGIE QUELLE HISTOIRE !

ENTRÉE
LIBRE

du 8 au 10 février 2013

ESPACE ROBESPIERRE
2 rue Robespierre - Ivry-sur-Seine III^e arrondissement d'Ivry

Programme complet sur www.ivry94.fr et www.ast.s.asso.fr



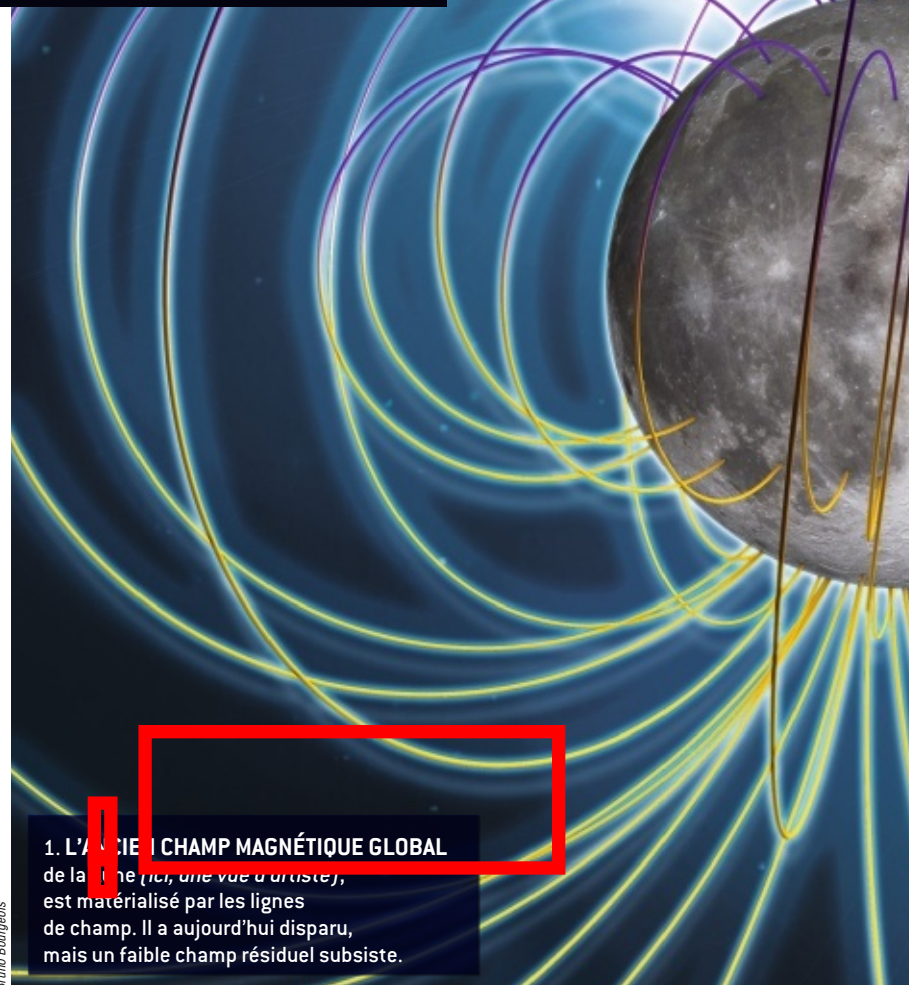
Le magnétisme de la Lune

D. Cébron, M. Le Bars et M. Wieczorek

Les échantillons de roches lunaires rapportés par les missions *Apollo* indiquent que la Lune présentait, dans le passé, un champ magnétique global. Son origine semble très différente de celle du champ magnétique terrestre.

La Lune a-t-elle, comme la Terre, un champ magnétique global ? La réponse est non, ce qui s'accorde avec l'image que l'on a de notre satellite, celle d'un astre mort et froid. Mais plusieurs indices montrent qu'il n'en a pas toujours été ainsi. Dans un lointain passé, la Lune a été pourvue d'un champ magnétique. Comment était-il produit ? Et pourquoi a-t-il disparu ? Les mécanismes connus, tels les mouvements de convection qui agitent la partie liquide du noyau de notre planète, ne peuvent pas expliquer le champ magnétique lunaire. Aussi les scientifiques ont-ils proposé d'autres scénarios.

Le champ magnétique de la Terre nous protège du bombardement des particules chargées en provenance du Soleil et contribue à préserver l'atmosphère. La Terre n'est pas un cas unique ; de nombreuses planètes – Jupiter, Saturne, Uranus ou Neptune – présentent aussi un tel champ. D'autres astres, tels Mars ou la Lune, semblent avoir eu dans leur passé un champ magnétique global. Dans le cas de la Lune, les échantillons de roche rapportés lors des missions *Apollo* présentent des traces d'un champ magnétique datant de plusieurs milliards d'années.



1. L'ANCIEN CHAMP MAGNÉTIQUE GLOBAL de la Lune (ici, une vue d'artiste), est matérialisé par les lignes de champ. Il a aujourd'hui disparu, mais un faible champ résiduel subsiste.

Bruno Buisson



L'ESSENTIEL

- Les roches de la Lune ont une aimantation rémanente qui témoigne de l'existence d'un champ magnétique global.
- Le champ terrestre est créé par les mouvements de convection dans le cœur liquide de la planète. Mais cette convection n'existe pas sur la Lune, qui a aussi un noyau liquide.
- Sur la Lune, l'effet dynamo, source du champ magnétique, serait dû à un mouvement de précession plus important dans le passé ou à des variations de la rotation créées par des impacts de météorites.

Une nouvelle analyse de ces échantillons par des techniques modernes, les missions spatiales récentes vers la Lune ainsi que des expériences de laboratoire et des simulations numériques en magnétohydrodynamique – l'étude des fluides conducteurs d'électricité –, permettent aujourd'hui de lever un coin du voile sur la question de l'origine du champ magnétique global de la Lune. Plusieurs scénarios expliquent comment un tel champ a pu être produit et décrivent l'origine de certaines anomalies observées dans la cartographie du champ résiduel.

Mesurer un champ magnétique

Pour mesurer le champ magnétique d'une planète, les astrophysiciens utilisent des magnétomètres embarqués sur des satellites, tel *Cersted* pour la Terre, ou sur des sondes d'exploration, par exemple *Lunar Prospector* pour la Lune, *Mars Global Surveyor* pour Mars ou encore *Galileo* pour Jupiter. Le champ magnétique d'une planète a deux origines possibles : dynamique, *via* des mouvements de fluides conducteurs dans l'une des couches internes de la planète (par exemple du fer liquide dans le noyau terrestre), ou statique, *via* une aimantation figée des roches de son enveloppe externe. Dans le second cas, il s'agit de la rémanence d'un champ magnétique dynamique qui a disparu au cours de l'évolution de la planète.

On distingue deux mécanismes responsables d'un champ magnétique dynamique. Le premier est lié à la présence proche d'un autre corps céleste qui crée un champ magnétique ambiant. Ce dernier est dévié par les mouvements du fluide interne de la planète, ce qui, par un phénomène d'induction, produit un champ planétaire propre. Le second mécanisme de formation d'un champ magnétique, spontané et autoentretenu, s'appuie sur la conversion de l'énergie cinétique des écoulements fluides en énergie magnétique ; on parle alors d'effet dynamo.

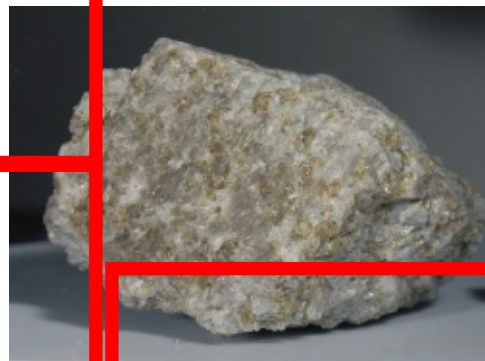
Dans les deux cas, l'intensité et la direction du champ créé présentent de fortes variations temporelles, liées aux déplacements du fluide conducteur. Cependant, seul un mécanisme de type dynamo est capable d'expliquer un champ magnétique intense comme celui de la Terre. L'effet dynamo est un mécanisme complexe dont la compréhension agite la communauté scientifique depuis plus d'un siècle : l'une des questions fondamentales est d'identifier

ANALYSES PALÉOMAGNÉTIQUES DES ROCHES LUNAIRES

Les échantillons de roches anciennes présentant une aimantation rémanente permettent d'obtenir des informations sur le champ magnétique présent au moment de son enregistrement dans les minéraux de la roche. L'âge de la roche peut être déterminé par datation radiométrique, ou radiodation. Cette méthode de datation absolue exploite la variation régulière au cours du temps de la proportion de radio-isotopes des éléments (par exemple l'argon, l'uranium ou le thorium) que contiennent les minéraux d'une roche. Une fois l'âge déterminé, il s'agit de remonter au champ magnétique présent au moment de l'aimantation de la roche. Pour ce faire, l'aimantation rémanente est tout d'abord mesurée avec un magnétomètre de précision. On soumet en-

suite l'échantillon à une succession de désaimantations, par exemple par chauffage, et d'aimantations contrôlées sous champ constant, afin de construire un abaque – une courbe de référence – de l'aimantation rémanente en fonction du champ magnétique externe imposé. Le report sur cet abaque de l'aimantation initiale fournit alors une mesure du champ magnétique passé.

Si le principe de la mesure est simple, sa mise en application soulève un grand nombre de difficultés. Il faut en particulier s'affranchir des aimantations parasites de l'environnement pour aboutir à une mesure précise. L'échantillon peut résulter d'une histoire géologique complexe ou avoir subi des aimantations successives, par choc ou par chauffage.



MASA/Johnson Space Center photograph S73-19456

Cet échantillon de roche lunaire a été rapporté par la mission Apollo 17 en 1972. Il a été analysé entre autres par J. Garrick-Bethell et ses collègues en 2009. De façon surprenante, cet échantillon a révélé qu'un champ magnétique intense régnait sur la Lune il y a 4,2 milliards d'années.

les mouvements fluides pouvant donner lieu à une dynamo, et le moteur de ces écoulements (voir l'encadré page 39).

Ainsi, sur Terre, le champ magnétique global est produit par la convection dite thermosolutale, liée à la fois au refroidissement de la Terre et à la solidification progressive de la partie interne du noyau, la « graine ». Ce champ est surtout dipolaire, avec des pôles magnétiques Nord et Sud reliés par des lignes de champ selon lesquelles s'alignent les boussoles, par exemple. Mais il présente aussi des fluctuations spatiales et temporelles : il peut parfois s'inverser, le pôle Nord magnétique devenant le pôle Sud, et inversement. La première preuve de l'origine convective de la dynamo terrestre et des renversements associés du champ magnétique a été apportée en 1995 par les simulations numériques des géophysiciens américains Gary Glatzmaier et Paul Roberts. Leur étude a ouvert la voie à de nombreux travaux et modèles de plus en plus élaborés, qui cherchent à reproduire les particularités du champ terrestre ou à expliquer, par un même mécanisme de dynamo convective, les champs magnétiques actuels de Mercure et de Ganymède (une lune de Jupiter), ou ceux de Mars et de la Lune, aujourd'hui disparus.

L'une des particularités de ce mécanisme est le renversement du champ magnétique. Certains minéraux ferromagnétiques, présents au sein des roches terrestres, mettent en évidence ce phénomène. Ces matériaux s'aimantent dans le sens du champ magnétique ambiant et conservent cette aimanta-

tion même après la disparition du champ extérieur. On parle d'aimantation rémanente. Ces aimants permanents peuvent acquérir leur aimantation de différentes façons : sur Terre, la plus commune est l'aimantation thermorémanente, acquise lors du refroidissement après un chauffage intense. Une partie du champ magnétique ambiant est enregistrée dans la roche lorsque la température descend en dessous d'un certain seuil, la température de Curie.

La roche : témoin d'un champ magnétique

Ce phénomène est à l'origine de l'aimantation des roches volcaniques sur les flancs des volcans ou au niveau des dorsales océaniques. D'ailleurs, en 1963, Lawrence Morley, Frederick Vine et Drummond Matthews ont utilisé la permanence d'orientation du champ rémanent des roches du plancher océanique atlantique – associé au renversement des pôles – et leur symétrie par rapport à l'axe de la dorsale pour prouver le phénomène d'expansion océanique, un élément clef dans le modèle de la tectonique des plaques.

L'aimantation rémanente est aussi utile en archéologie. Les matériaux ferromagnétiques contenus dans les argiles travaillées au feu (céramiques, fours, etc.) enregistrent l'orientation du champ magnétique lors de leur dernier chauffage. En mesurant ce champ rémanent, on parvient alors à dater ces vestiges.

À l'échelle d'une planète, les roches réparties à sa surface et présentant une

■ LES AUTEURS

David CÉRON est postdoctorant à l'École polytechnique fédérale de Zurich, en Suisse.

Michael LE MARIS est chargé de recherche à l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre de Marseille.

Mark WIECZOREK est directeur de recherche au CNRS à l'Institut de physique du globe de Paris.

aimantation rémanente produisent un champ magnétique de faible intensité, avec d'importantes fluctuations locales en amplitude et en direction, mais constant dans le temps. C'est ce type de champ magnétique que l'on observe sur la Lune aujourd'hui.

Cartographie du champ rémanent lunaire

Les données obtenues lors des survols de la Lune par les missions spatiales telles que la sonde américaine LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*), lancée en 2009, indiquent que le champ magnétique actuel à la surface de la Lune est figé et de faible intensité – il est environ 5 000 fois inférieur au champ magnétique à la surface de la Terre. Il provient donc de l'aimantation rémanente des roches de la croûte (voir la figure 2).

Un champ magnétique rémanent est le vestige d'un champ magnétique global aujourd'hui disparu. Pour que ce champ global ait aimanté la roche lunaire, celle-ci a dû atteindre des températures élevées. Par quel phénomène ?

L'échauffement ayant conduit à l'aimantation mesurée est attribué aux impacts météoritiques : lors de la chute d'une météorite, la zone d'impact subit une élévation intense de température, avant de se refroidir lentement. Au début, l'agitation thermique empêche la roche de développer une aiman-

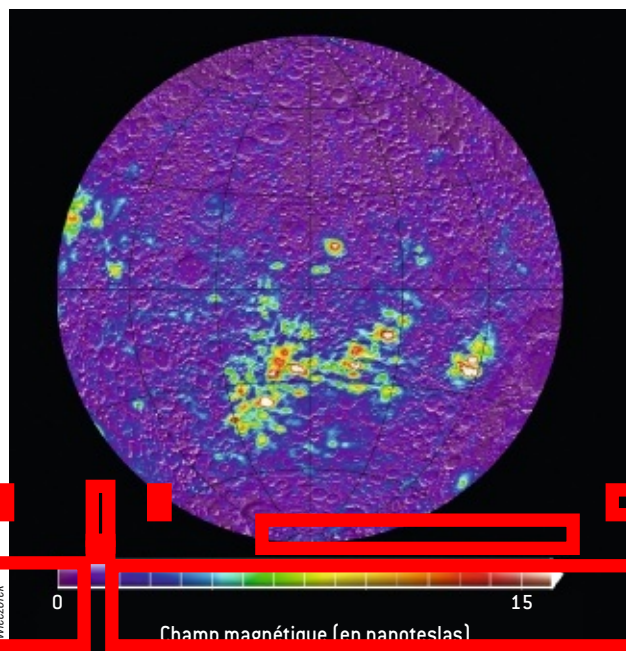
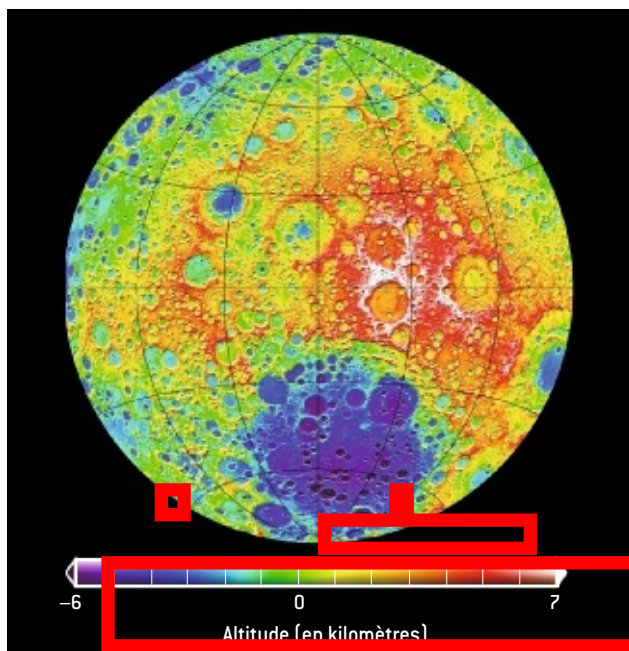
BIBLIOGRAPHIE

- R. C. Weberg et al., *Direct detection of the lunar core*, *Science*, vol. 331, pp. 309-312, 2011.
- C. A. Dwyer et al., *A long-lived lunar dynamo*, *Nature*, vol. 479, pp. 212-215, 2011.
- M. Le Bars et al., *An impact-driven dynamo for the early Moon*, *Nature*, vol. 479, pp. 215-218, 2011.
- L. Garrick-Bethell et al., *Early lunar magnetism*, *Science*, vol. 323, pp. 356-359, 2009.
- L. Hood et N. A. Artemieva, *Antipodal effects of lunar basin-forming impacts: initial 3D simulations and comparisons with observations*, *Icarus*, vol. 193, pp. 495-503, 2008.
- A. Vilgner, *Recession driven dynamos*, *Physics of Fluids*, vol. 17, 03104, 2005.
- G. Glatzmaier et Peter Olson, *A geodynamo : une histoire turbulente*, *Pour la Science*, n° 331, mai 2005.

ation stable. Mais après une durée qui peut atteindre une centaine de milliers d'années, selon la puissance de l'impact météoritique et la profondeur considérée, la température des roches repasse au-dessous de la température de Curie : l'agitation thermique devient assez faible pour que l'aimantation se fige et s'aligne sur le champ magnétique externe (voir la figure 3). Le champ rémanent actuel résulte de la superposition de l'ensemble des aimantations enregistrées dans la croûte au fil des multiples impacts qui ont ponctué l'histoire de la Lune : il varie beaucoup sur de petites échelles de distance, et il n'existe aujourd'hui pas de champ global. Le magnétisme rémanent de la croûte ne permettrait donc pas à un astronaute de s'orienter avec une boussole !

Les cartes du champ magnétique de la Lune mettent aussi en évidence des régions où le champ rémanent est plus intense, surtout au sein de six grands cratères d'impact ainsi qu'aux antipodes de quatre grands bassins d'impact. L'existence de ces anomalies du champ rémanent peut aussi être expliquée à partir de collisions avec des météorites (voir l'encadré page 38).

Les mesures effectuées depuis l'espace fournissent une information instantanée sur l'état actuel du magnétisme rémanent, mais elles ne donnent aucune information sur l'origine du champ magnétique global : provenait-il de la Lune elle-même ? De la



2. CARTES DU RELIEF ET DU CHAMP MAGNÉTIQUE de la face cachée de la Lune. Ce côté est plus exposé aux bombardements de météorites, qui ont formé de nombreux cratères (à gauche). Le champ

magnétique rémanent (à droite) est faible sur l'ensemble de la surface, à l'exception de certaines anomalies qui correspondent à des cratères ou aux antipodes d'un impact de météorite.

Les anomalies du champ rémanent

Grâce au bombardement massif par les météorites, les roches ont enregistré le champ magnétique global de la Lune (voir la figure 3 ci-dessous). Les impacts météoritiques permettraient aussi d'expliquer certaines des anomalies magnétiques observées sur la carte du champ rémanent lunaire actuel (voir la figure 2). Plusieurs zones, situées aux antipodes de certains grands cratères, présentent un champ d'intensité plus élevé.

Les simulations numériques réalisées en 2008 par Lon Hood (Université de l'Arizona) et Natalia Artemieva (Université de Tucson, États-Unis, et Institut de dynamique de la géosphère de

l'Académie des sciences à Moscou) montrent qu'à la suite d'un impact important, un immense nuage de plasma se forme. Les particules de matière éjectée acquièrent une charge électrique et leur mouvement crée des courants électriques transitoires ainsi que des champs magnétiques au sein du nuage. Ce dernier, très bon conducteur, est aussi sensible au champ magnétique déjà existant (par exemple celui du vent solaire) ; il l'amplifie soit en concentrant ce champ dans

le nuage, soit par confinement entre le nuage et le manteau supérieur lunaire faiblement conducteur.

Quand le nuage arrive aux antipodes, en environ une heure –, le champ magnétique peut être amplifié d'un facteur allant jusqu'à 100. En retombant, les éjectas de roche présents dans le nuage constituent autant de boucles de courant. Le fond du cratère, lequel enregistre le champ magnétique intense sur une zone réduite.

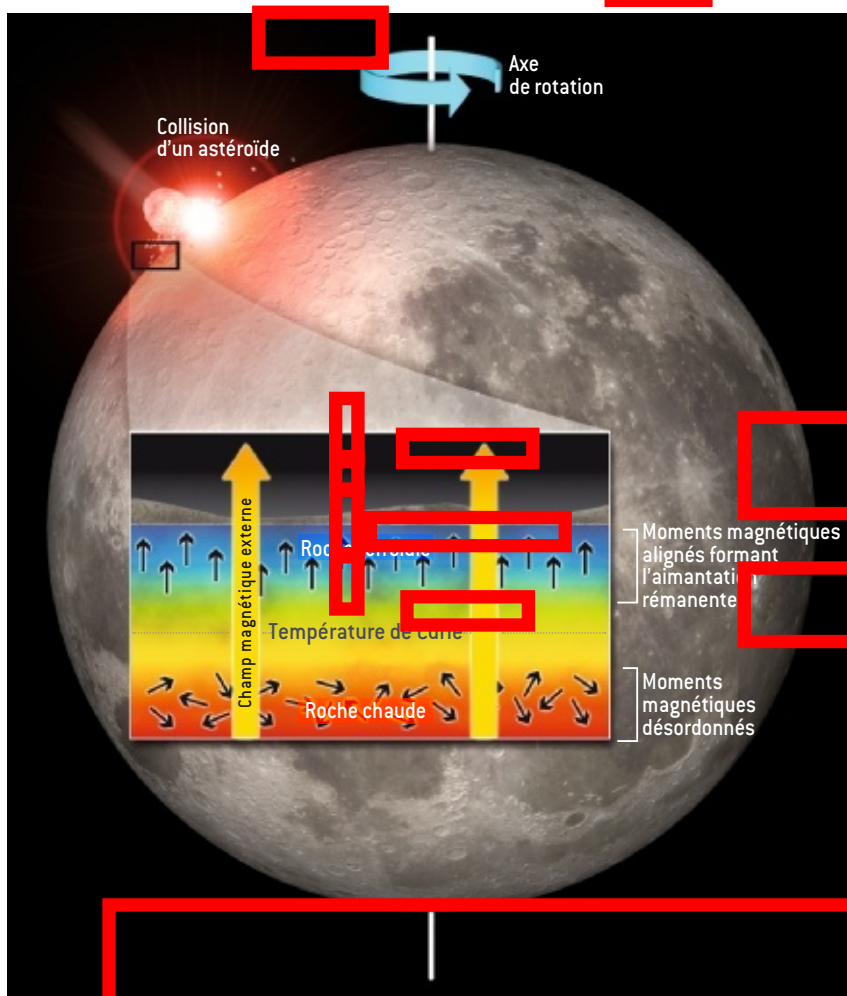
Ce mécanisme explique une partie des anomalies magnétiques observées, mais il n'explique pas l'intégralité de l'aimantation rémanente des roches lunaires. L'existence d'un mécanisme de dynamo interne à la Lune semble indispensable.

Terre ? Était-il lié à un mécanisme d'induction ou de dynamo ? Les échantillons de roches rapportés lors des missions *Apollo* complètent les mesures spatiales et aident à répondre à ces questions. Leur analyse permet de déterminer, par radiodation, le temps écoulé depuis que la roche s'est solidifiée et d'estimer, par une série de désaimantations et d'aimantations contrôlées, l'amplitude du champ ambiant à l'époque (voir l'encadré page 30). Ces mesures, en particulier celles réalisées en 2009 par Ian Garrick-Bethell, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et ses collègues indiquent que les roches les plus aimantées se sont formées dans un intervalle de quelques millions d'années, il y a environ quatre milliards d'années, en présence d'un champ magnétique intense, compris entre 1 et 100 microteslas (celui de la surface de la Terre est de l'ordre de 50 microteslas). Cette période correspondrait, selon certains scénarios, à une époque où la surface de la Lune était intensément bombardée par des météorites qui ont permis, en faisant fondre les roches, d'y enregistrer le champ magnétique ambiant.

Un tel champ magnétique, du même ordre de grandeur que celui à la surface de la Terre aujourd'hui, était trop important pour être dû à un phénomène d'induction. Ainsi, la Lune était dotée d'un champ magnétique, produit par un mécanisme de dynamo, dont il reste à expliquer l'origine.

Le mystère de la dynamo lunaire enfin résolu ?

Un premier élément de réponse a été apporté par Renee Weber, du Centre de vol spatial Marshall de la NASA, à Huntsville aux États-Unis et ses collègues. Ces chercheurs ont repris en 2011 les données sismiques recueillies par les quatre sismomètres déployés sur la Lune lors des missions *Apollo*. Ces mesures avaient déjà permis, dans les années 1970, d'évaluer l'épaisseur de la croûte lunaire à environ 50 kilomètres et de prouver l'existence d'une couche riche en métaux à la base du manteau lunaire. En appliquant des méthodes modernes d'analyse, l'équipe de R. Weber a fourni la première preuve de la présence d'un nouveau liquide sous la surface lunaire, à 1 400 kilomètres de profondeur. La Lune actuelle, que l'on pouvait croire entièrement solide, possède aujourd'hui encore un cœur



3. L'AIMANTATION RÉMANENTE APPARAÎT SUITE À UNE COLLISION D'UN ASTÉROÏDE, qui fait fondre la roche en profondeur. Lorsque la température est élevée, le moment magnétique des atomes n'a pas de direction privilégiée. L'agitation thermique empêche les moments de s'aligner sur le champ magnétique global. Après le choc, la température de la roche diminue et passe sous la température de Curie : les moments s'alignent alors tous sur le champ externe.

liquide de métal conducteur. La température élevée dans le cœur viendrait de la présence d'éléments radioactifs – comme c'est le cas d'une partie de l'énergie entretenant le cœur liquide terrestre. Le liquide conducteur est l'ingrédient principal pour obtenir un effet dynamo. Il faut cependant que le liquide soit parcouru de mouvements turbulents pour créer un champ magnétique.

Par analogie avec la Terre, Dave Stegman, de l'Université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont proposé en 2003 que la dynamo de la Lune résultait d'un mécanisme de convection. Cependant, du fait de sa petite taille, la Lune s'est refroidie en quelques centaines de millions d'années

après sa formation, ce qui a arrêté tout phénomène convectif : dans ces conditions, le scénario d'une dynamo par convection est peu réaliste. Pour expliquer une éventuelle dynamo lunaire, il faut trouver une autre source de mouvements dans son noyau.

En 2011, notre équipe européenne et une équipe américaine ont proposé simultanément mais de façon indépendante, que l'énergie nécessaire à ces mouvements pouvait être apportée par la rotation de la Lune, suivant une idée proposée dès 1968 par Willem Malkus, de l'Université de Californie à Los Angeles. Cependant, il est possible de proposer qu'un mouvement de rotation en bloc d'un noyau liquide, qui suit la rotation

du manteau, est trop simple pour amorcer un effet dynamo. Comment obtenir des écoulements intenses et turbulents ?

Une première possibilité provient du mouvement de précession de l'axe de rotation de la Lune. Au fil du temps, l'axe de rotation d'une planète ou d'un satellite change lentement de direction, et décrit un cône autour de la perpendiculaire au plan de son orbite. Par exemple, l'axe de rotation de la Terre est incliné d'environ 23 degrés, décrit un tel cône en environ 26 500 ans, ce qui est à comparer aux cinq degrés d'obliquité de la Lune et à sa période de précession de 18 6 ans. La précession d'une planète peut exciter des instabilités hydrodynamiques à

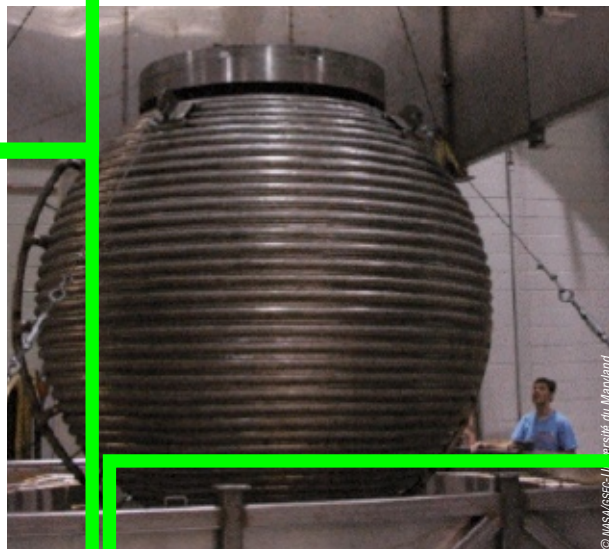
L'EFFET DYNAMO, UN DÉFI THÉORIQUE, EXPÉRIMENTAL ET NUMÉRIQUE

Un champ magnétique planétaire de grande échelle est créé grâce aux écoulements des fluides conducteurs d'électricité, tels ceux du noyau liquide terrestre. Ce mécanisme est nommé effet dynamo, car, comme pour la dynamo d'un vélo, un champ magnétique et un courant électrique naissent d'un mouvement. Le mécanisme de dynamo fluide, proposé par le physicien irlandais Joseph Larmor dès 1919, nécessite des écoulements particuliers : les écoulements doivent être suffisamment amortis pour compenser son amortissement par effet Joule – dissipation de l'énergie en chaleur.

Malgré de nombreux travaux, ce problème magnétohydrodynamique reste assez mal compris et son étude demeure un défi, que ce soit pour l'approche théorique, expérimentale ou numérique. En fait, les travaux théoriques n'ont pas permis d'obtenir de conditions générales d'existence de l'effet dynamo. Au contraire, des théorèmes dits antidynamo stipulent que des écoulements trop simples ne produisent pas de champ magnétique. Les écoulements doivent être complexes, et très peu de modèles théoriques ont pu être développés à ce jour.

À ces difficultés s'ajoute celle de reproduire l'effet dynamo dans une expérience contrôlée. En effet, les fluides très

conducteurs, tels que le mercure ou le sodium, sont dangereux et difficiles à manipuler : le mercure est neurotoxique et le sodium réagit de façon explosive en présence d'eau. Cela impose des mesures de sécurité strictes. Par ailleurs, la force et la complexité des écoulements nécessaires imposent de construire des expériences



L'expérience de l'Université du Maryland est constituée de deux sphères hémisphériques – la plus grande ayant un diamètre de trois mètres. La géométrie s'approche des conditions régnant au sein d'une planète. Elle devrait permettre de reproduire un champ magnétique de celui de la Terre à partir de l'effet dynamo.

de grande échelle, capables de produire des vitesses d'écoulement importantes pendant plusieurs heures. Pour donner une idée des contraintes pesant sur ce type d'expériences, l'ensemble du disposi-

positif expérimental, installé sur une période de quelques semaines d'intervalle, un effet dynamo a été obtenu dans un écoulement contrôlé pendant quelques heures. Avant qu'une fuite de sodium liquide ne mette fin à l'expérience. Un autre effet dynamo a été obtenu

Enfin, l'expérience VKS (pour *Von Karman Sodium*), développée par l'École normale supérieure de Paris et par le CEA à Saclay, a produit en septembre 2006 la première dynamo fondée sur un écoulement libre et turbulent, produit par des disques tournants. Ce dispositif a mis en évidence des renversements de polarité.

D'autres projets sont en cours : dans le Maryland, à Madison, aux États-Unis, et à Dessau, en Allemagne.

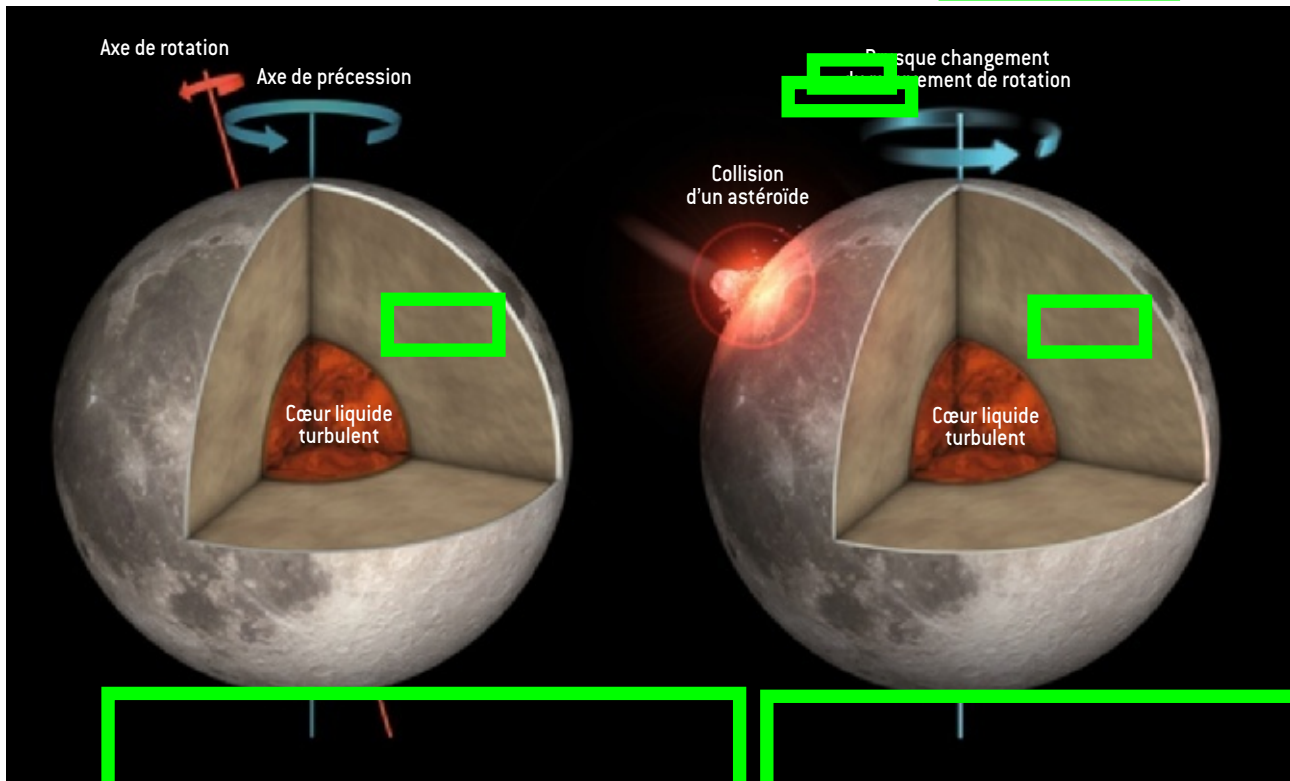
Enfin, l'étude de l'effet dynamo par le biais de simulations numériques est tout aussi complexe. Elle nécessite la résolution simultanée du système d'équations non linéaires couplées de la magnétohydrodynamique et des écoulements complexes et turbulents. Malgré l'utilisation de méthodes numériques les plus performantes et des supercalculateurs les plus puissants, les régimes de paramètres des planètes et des étoiles restent inaccessibles aux simulations. Ces études ont néanmoins rapporté quelques succès tels que la reproduction numérique d'un effet dynamo produit par des écoulements convectifs, de son caractère dipolaire et de ses inversions, comme c'est le cas au sein du noyau terrestre actuel. Plus récemment, en 2005, la simulation d'Andreas Tilgner, de l'Université de Göttingen, en Alle-

à l'échelle du laboratoire, tels que le mercure ou le sodium, sont dangereux et donc difficiles à manipuler.

dynamo fluide n'a été réussie que par trois expériences différentes. Tout d'abord, en 1999, à quelques

ans d'élaboration, coûté quelque sept millions d'euros et occupait trois étages d'un bâtiment dédié.

de créer un effet dynamo à partir de la précession d'une cavité fluide en rotation.



4. LES MODÈLES DE DYNAMO LUNAIRE nécessitent la production de turbulence dans le cœur liquide du satellite. Une possibilité est que, peu après la formation de la Lune, le mouvement de précession – de l'axe de rotation de la Lune, qui décrit un cône – aurait pu être assez intense, avec une forte inclinaison et une vitesse de rotation élevée, pour créer des turbulences (à gauche). L'équipe des auteurs a mis en évidence une autre

possibilité, fondée sur l'instabilité elliptique. La Lune a une forme légèrement elliptique du fait de l'attraction terrestre. Une variation dans la vitesse de rotation, due à la collision avec une météorite, peut créer des mouvements turbulents dans le cœur de la Lune (à droite). Les données actuelles ne permettent pas de préciser les rôles respectifs de ces mécanismes, qui pourraient d'ailleurs être complémentaires.

l'origine d'écoulements turbulents dans le noyau liquide tout entier, selon l'influence de trois paramètres essentiels : une vitesse de précession élevée, un angle de précession important ou un fort aplatissement aux pôles (comme pour la Terre, la rotation d'une planète sur elle-même déforme la sphère, qui s'aplatit aux pôles et forme un renflement à l'équateur). L'effet dynamo de ce type d'écoulement a été prouvé en 2005 par les simulations numériques de Andreas Tilgner, à l'Université de Göttingen, en Allemagne.

En 2011, Christina Dwyer, de l'Université de Californie à Santa Cruz, et ses collègues ont étudié un tel scénario de dynamo par précession dans le cas de la Lune. Leurs résultats montrent que la précession actuelle ne peut alimenter une dynamo lunaire. Mais les conditions de rotation ont pu être différentes par le passé. En effet, la Lune est issue d'une collision gigantesque entre la Terre primitive et un planétoïde de la taille de Mars, survenue 42 millions d'années à peine après la naissance du Système solaire. La Lune s'est ensuite formée par accrétion d'une partie des débris de

la collision, éjectés dans l'espace sur une orbite très proche de la Terre.

Sous l'effet de rotations propre et orbitale très rapides ainsi qu'à des forces gravitationnelles intenses exercées par la Terre, la Lune était alors soumise à des mouvements de précession plus marqués autour d'un angle d'inclinaison plus grand, ainsi qu'à des basculements de son axe de rotation.

La dynamo lunaire activée par la précession

Il y a environ quatre milliards d'années, un effet dynamo aurait ainsi persisté pendant quelques centaines de millions d'années, jusqu'à ce que la Lune s'éloigne assez de la Terre et que ses mouvements de rotation et de précession s'atténuaient progressivement, pour finalement atteindre le calme relatif de sa situation actuelle.

Les impacts météoritiques pourraient aussi être un vecteur de conversion de l'énergie de rotation de la Lune en déplacements fluides dans son noyau. La Lune a subi de nombreux impacts au cours

de son histoire, en particulier durant la période du « grand bombardement tardif » entre 4,1 et 3,9 milliards d'années. À cette époque, la Lune était déjà, comme aujourd'hui, en rotation synchrone : elle tourne sur elle-même dans le même temps qu'elle accomplit une révolution autour de la Terre, lui présentant ainsi toujours la même face. Certains cratères lunaires atteignant 700 kilomètres de diamètre ont été produits par des météorites de quelques dizaines de kilomètres de rayon voyageant à plusieurs kilomètres par seconde. Ils témoignent de collisions assez puissantes pour avoir désynchronisé pendant un certain temps la rotation de la Lune autour de la Terre. Par ailleurs, en raison des forces gravitationnelles intenses exercées par la Terre, la Lune a une forme elliptique un peu allongée dans la direction de la Terre. Pour étudier ces phénomènes, notre équipe (Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre à Marseille, Institut de physique du globe de Paris et l'Observatoire royal de Belgique), a utilisé des expériences de laboratoire, des simulations numériques et

des modèles théoriques. En 2011, nous avons montré que dans cette configuration, une désynchronisation sous l'effet d'un impact crée des mouvements fluides qui pourraient avoir excité une instabilité hydrodynamique dite elliptique, rendant l'écoulement turbulent et donc favorable à l'effet dynamo. Le champ magnétique présent sur la Lune il y a quatre milliards d'années aurait ainsi pu résulter d'une succession d'épisodes de dynamo associés aux turbulences dues aux impacts. Le champ magnétique lié à chaque impact aurait alors eu une durée de vie d'une dizaine de milliers d'années, échelle de temps nécessaire à la Lune pour se synchroniser de nouveau.

Les scénarios complémentaires

Ainsi, le champ magnétique lunaire résulte sans doute de mécanismes qui puisent leur énergie dans la rotation de la Lune ou dans les impacts météoritiques. Ces deux modèles de dynamo lunaire sont assez séduisants, car ils expliquent pourquoi

le champ magnétique a pu exister dans le passé et avoir aujourd'hui disparu.

Loi de s'exclure mutuellement, ces mécanismes sont d'ailleurs compatibles, voire complémentaires. Ainsi, un champ magnétique continu pourrait avoir été engendré par une dynamo de précession, à laquelle se seraient superposées des périodes transitoires où le champ magnétique était plus intense en raison de l'impact d'une météorite. Pour distinguer ces différents mécanismes ou établir une chronologie, il faudrait disposer d'un jeu de données paléomagnétiques précis et complet, échantillonné sur toute la surface et sur toute l'histoire de la Lune. Ce qui serait difficilement réalisable.

Les différents modèles proposés soulèvent de nouvelles questions. Par exemple, l'origine de l'instabilité hydrodynamique de précession reste mal connue, et la production d'un champ magnétique par ce biais n'a été caractérisée que dans des configurations limitées et peu turbulentes, accessibles aux simulations numériques. Une expérience magnétohydrodynamique visant à compléter ces résultats est actuelle-

ment en cours de développement à Dresde, en Allemagne. De même, le modèle de dynamo produit par l'instabilité elliptique est sans doute correct, mais il reste à le prouver, par exemple par des simulations numériques. L'absence de symétrie de révolution, hypothèse souvent exploitée pour mener à bien les simulations, impose de développer de nouvelles approches pour aborder la magnétohydrodynamique dans une géométrie ellipsoïdale.

Ces différents scénarios, développés pour expliquer le magnétisme lunaire, ont en outre une portée plus générale. Ils montrent que les modèles développés pour comprendre la Terre ne sont pas transposables. Contrairement à ce qui a longtemps été admis, la présence d'un champ magnétique planétaire n'implique pas toujours des mouvements de convection au sein d'une couche fluide interne. Comme pour la Lune, d'autres mécanismes seront sans doute nécessaires pour comprendre les champs magnétiques de Mercure, de Ganymède ou des planètes extrasolaires, voire de certains gros astéroïdes. ■

france culture

LA MARCHÉ DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

Aurélié Luneau
14h-15h / chaque jeudi

france culture

en partenariat avec **POUR LA SCIENCE**

© France Culture, 2013. Photo: Marc Duvigneau / Philippe Barthelemy. Courtesy gallery Stages - ADAGP Paris 2013

La lutte biologique, stratégie durable

1. DES COCONS D'UNE GUÊPE PARASITOÏDE sont accrochés au dos d'une chenille. La guêpe pond ses œufs dans le corps de la chenille, où les larves se développent avant de percer la cuticule et de former leurs cocons. À l'inverse des parasites, les parasitoïdes tuent leur hôte en se développant. Ils sont très utilisés dans la lutte biologique.

En France, le pyrale du maïs (*Plutella maculipennis*), un petit papillon, cause des dégâts majeurs aux cultures. Ses larves dévorent de multiples plantes, tels le maïs ou le tournesol, et peuvent faire chuter les rendements de 30 pour cent. Pour les combattre, la Société *Biotop*, en coopération avec l'INRA (Institut national de la recherche agronomique), réalise des lâchers annuels de trichogrammes *Trichogramma brassicae*: cet hyménoptère parasitoïde pond dans les œufs de pyrale (les parasitoïdes sont des organismes se développant sur ou à l'intérieur d'un autre organisme qu'ils finissent par tuer). Plus de 75 pour cent des œufs de pyrale sont détruits par ce traitement, qui aide à limiter la pullulation de l'insecte, et donc les dommages aux récoltes.

Ce type de programme est qualifié de lutte biologique. En 1971, l'Organisation internationale de lutte biologique et intégrée contre les arthropodes nuisibles, ou OILB, a défini la lutte biologique

comme l'utilisation d'organismes antagonistes, qui sont des prédateurs, des pathogènes ou des parasitoïdes. C'est d'ailleurs initialement pour lutter contre les ravageurs que le concept de lutte biologique a été formalisé, lors d'un congrès international d'entomologie à Stockholm, en 1948. Cependant, la lutte biologique vise tous les organismes nuisibles : les micro-organismes pathogènes des plantes cultivées, les plantes indésirables et invasives (telles les mauvaises herbes), les insectes vecteurs de maladies animales (moustiques, mouches tsé-tsé) ou végétales (pucerons, mouches blanches), ainsi que de petits vertébrés tels que les rats.

Un temps affaiblie par l'arrivée des pesticides, la lutte biologique est revenue sur le devant de la scène. Son importance est variable selon les pays : en France, elle était par exemple appliquée sur deux pour cent de la surface agricole utile (en 2004) contre 12 pour cent en Autriche (en 2002). Son essor récent est particulièrement marqué en raison d'une prise de conscience générale

La lutte biologique consiste à réguler les populations d'organismes nuisibles aux cultures ou à la santé à l'aide d'autres organismes (prédateurs, pathogènes...). Depuis quelques années, elle connaît un essor important.

Paul-André Calatayud

comme « l'utilisation d'organismes vivants ou de leurs produits pour empêcher ou réduire les pertes ou dommages causés par des organismes nuisibles et les maintenir en dessous d'un seuil de nuisibilité ». Au cours des dix dernières années, les études relevant de cette approche ont été près de quatre fois plus nombreuses que durant la décennie précédente.

Les travaux sur la lutte chimique se sont aussi notablement accrus, mais ils portent surtout sur la toxicité des pesticides, sur les méthodes pour les détecter (dans les aliments, dans l'eau), sur les mécanismes de résistance développés par les insectes... L'ère où les pesticides étaient considérés comme une solution miracle et où ils occultaient toutes les autres méthodes de lutte semble donc révolue.

La plupart des travaux de lutte biologique concernent la protection des cultures contre les insectes ravageurs. Pour lutter contre eux,

des inconvénients de la lutte chimique : pollution des sols et de l'environnement, danger pour la santé humaine, efficacité limitée dans le temps... Nous présentons ici le principe et l'arsenal de la lutte biologique, qui se perfectionne de plus en plus avec le développement de nos connaissances sur le fonctionnement des écosystèmes et sur les mécanismes biologiques en jeu dans les interactions des différents acteurs.

La définition de la lutte biologique donnée par l'OILB implique une notion importante d'équilibre. À l'inverse des méthodes chimiques, la lutte biologique ne vise pas nécessairement l'éradication de l'organisme nuisible, mais son maintien à une densité raisonnable. Ainsi, elle respecte mieux les écosystèmes.

En aménageant ces systèmes, notamment pour les cultures, l'homme les a bouleversés. Il a déséquilibré les réseaux

L'ESSENTIEL

■ Utilisée depuis des millénaires, la lutte biologique a été marginalisée dans de nombreux pays par l'arrivée des pesticides.

Ces dernières années, grâce à des progrès écologiques, elle revient en force.

■ Elle vise principalement les insectes ravageurs de cultures, mais aussi les organismes nuisibles à la santé humaine et à la médecine tsé-tsé.

■ On cherche à améliorer son efficacité en étudiant les mécanismes biologiques en jeu dans les interactions des différents acteurs.

© William D. Adams - The Stock Connection/Factum/Corbis

trophique (les réseaux de chaînes alimentaires) en privilégiant des maillons particuliers de ces réseaux. Ainsi, quand une seule espèce végétale est cultivée (monoculture), elle influe sur la faune locale d'insectes, ou entomofaune. Les insectes qui se nourrissent de ce végétal quittent en effet leur habitat initial pour aller vers cette culture où les plantes sont abondantes, en bon état, riches en nutriments et présentes chaque année. Leurs organismes antagonistes (prédateurs, parasites, etc.) mettent du temps à s'apercevoir de leur présence dans cette zone et ne parviennent pas à empêcher leur pullulation, comme ils le faisaient dans la zone d'origine.

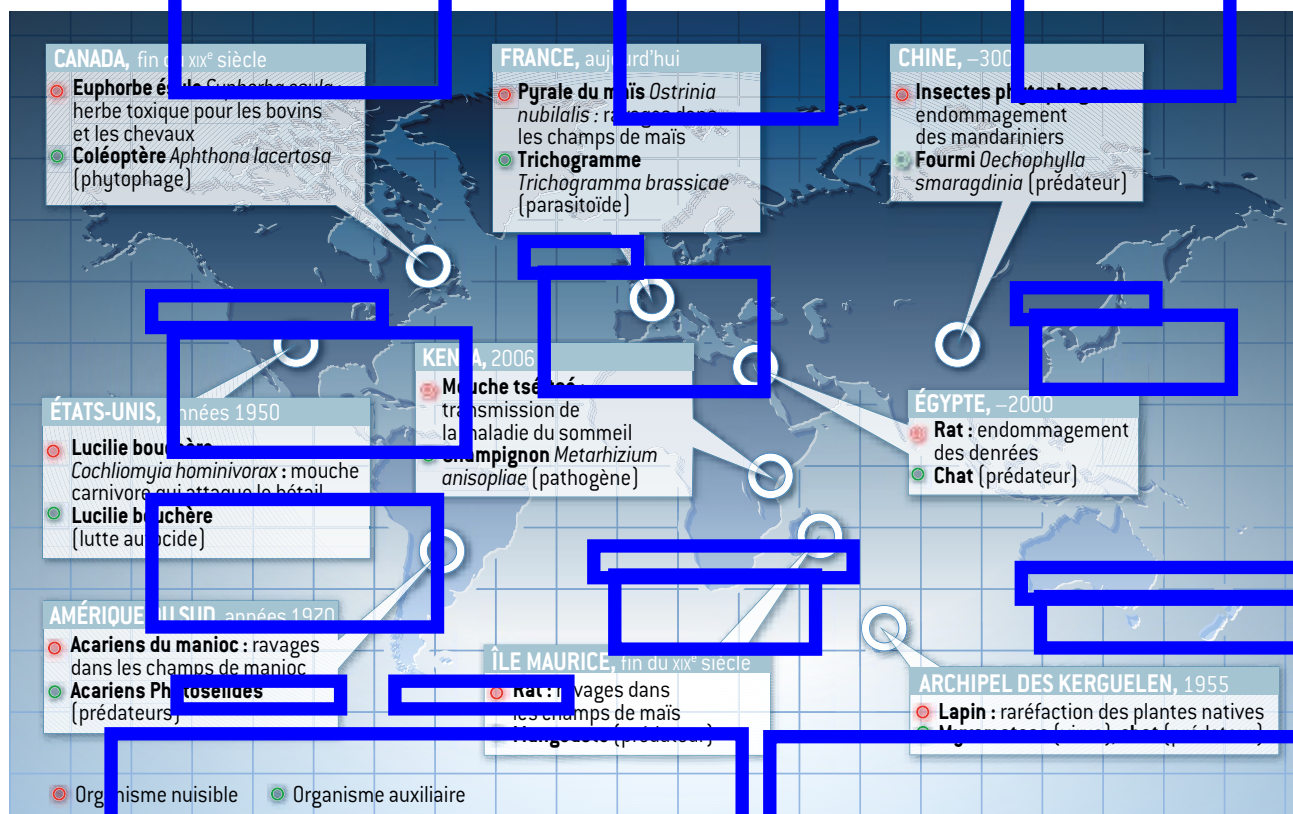
Ce phénomène est accentué lorsque l'insecte phytophage est exotique, c'est-à-dire introduit accidentellement dans une nouvelle zone géographique. Dans ce cas, ses antagonistes sont le plus souvent absents de sa région d'arrivée. Il se crée alors un déséquilibre de la chaîne trophique

plante-insecte phytophage-antagonistes. La lutte biologique vise à rétablir l'équilibre de l'écosystème en introduisant de nombreux organismes antagonistes, en une seule ou plusieurs fois. Cela prend du temps, mais, en contrepartie, cette stratégie peut se révéler efficace à long terme, tout en respectant l'environnement.

Une arrivée tardive en Occident

La lutte biologique ne date pas d'hier. Elle a fait son apparition en Égypte, environ 2000 ans avant notre ère : le chat y a été domestiqué afin de lutter contre les rongeurs, redoutés fléaux pour les denrées stockées. En Asie elle a aussi été appliquée très tôt : vers 300 avant notre ère, dans la province du Guandong, au Sud de la Chine, des fermiers effectuaient des lâchers de fourmis *Oecophylla smaragdinia*, prédatrices d'insectes ravageurs des mandariniers.

En Occident, la lutte biologique est arrivée plus tardivement. Du XVI^e siècle jusqu'au début du XVIII^e, divers naturalistes ont étudié des prédateurs et des parasites d'insectes. En 1740, le physicien et naturaliste français René-Antoine Ferriault de Réaumur a eu l'idée de s'en servir pour lutter contre les organismes nuisibles. En 1760, la lutte biologique a commencé à être utilisée par les Européens, principalement dans leurs possessions insulaires : à l'île Maurice et en Nouvelle-Zélande, le martin triste (*Acridotheres tristis*), un passereau de la taille d'un merle, a été introduit pour lutter contre les insectes ravageurs de canne à sucre ; et dans l'île de Trinidad, des mangoustes, de petits mammifères carnivores, ont été disséminées pour combattre les rats. Ce n'est qu'à partir du XIX^e siècle que la lutte biologique a été utilisée sur les continents, par exemple aux États-Unis et en France, pour lutter contre différents ravageurs,



2. DES PROGRAMMES DE LUTTE BIOLOGIQUE ont été appliqués un peu partout dans le monde. Ils utilisaient le plus souvent des insectes contre d'autres insectes ravageurs de récolte, mais aussi des micro-organismes pathogènes contre des insectes, des mammifères contre des mammifères, des insectes contre des plantes... Dans le cas de la lutte auto-cide, on se sert de l'organisme nuisible lui-même, en lâchant des mâles préalablement stérilisés qui entrent en compétition avec les mâles sauvages pour les accouplements. Toutes ces opérations ont

permis de limiter la prolifération des organismes nuisibles ciblés, voire de faire chuter drastiquement leurs populations. Ainsi, au Kenya, des chercheurs de l'ICIPE (*International Center of Insect Physiology and Ecology*) ont éliminé grâce à un pathogène 82 pour cent des mouches tsé-tsé peuplant une île du lac Victoria ; ces mouches transmettent à l'homme et au bétail une maladie parasitaire, couramment nommée maladie du sommeil, causant des pertes annuelles de production bovine (viande et lait) estimées à près d'un milliard d'euros pour l'Afrique.

tels le bombyx disparate (un papillon de nuit), le phylloxéra (un puceron) et des cochenilles.

En 1930, les pesticides sont arrivés sur le marché, notamment le dichlorodiphényltrichloréthane, ou DDT. Ils ont concurrencé la lutte biologique, qui a décliné, voire disparu par endroits. Elle est revenue en force à partir des années 1960, lorsque des résistances aux insecticides se sont développées et que l'homme a commencé à prendre conscience des conséquences néfastes de ces produits sur la santé et sur l'environnement. Ce phénomène s'est accéléré récemment.

Même durant sa période creuse, la lutte biologique est restée très utilisée par les pays du Sud, par exemple en Afrique et en Amérique du Sud, où les agriculteurs n'avaient pas les moyens d'acheter des pesticides. De grands centres internationaux, tels le CIAT (*Centro Internacional de Agricultura Tropical*), l'IITA (*International Institute of Tropical Agriculture*) et l'ICIPE (*International Centre of Insect Physiology and Ecology*), les ont aidés par des programmes de grande envergure. D'autres pays, tel Cuba, que l'embargo américain empêchait d'avoir accès aux pesticides, ont été contraints de privilégier la lutte biologique.

Ainsi, la lutte biologique compte nombre d'applications emblématiques un peu partout dans le monde (voir la figure page ci-contre). Dans certains cas, les organismes nuisibles et auxiliaires sont tous deux des vertébrés, les premiers étant par exemple des rats et les seconds des mangoustes. Dans de nombreux autres cas, on fait appel à des insectes (prédateurs et parasitoïdes) contre des insectes ravageurs de culture. En Afrique, l'IITA et l'ICIPE ont utilisé des guêpes parasitoïdes (*Epidonocarsis lopezi* et *Cotesia lavipes*) à partir du milieu des années 1960 pour limiter respectivement les pullulations de cochenilles du manioc (*Phenacoccus manihoti*) et de lépidoptères foreurs des tiges de maïs (*Chilo partellus*), introduits accidentellement sur le continent.

On combat aussi fréquemment les insectes ravageurs de cultures en pulvérisant des micro-organismes pathogènes. Ces derniers rendent malades les insectes, qui contaminent leurs congénères et finissent par mourir. Parmi les plus utilisés, on trouve : les champignons des genres *Beauveria* et *Metarhizium* ; la bactérie *Bacillus thuringiensis*, employée contre les insectes ravageurs de culture, les larves de moustiques et de simules (des moucheron) ; des virus par-

La lutte biologique : une méthode d'élimination		une épidémie bactérienne	
L'autodissemination est une contamination en cascade des insectes ravageurs. Des études sont en cours pour l'appliquer à <i>Busseca fusca</i>, un petit papillon de nuit qui est un important ravageur du maïs en Afrique subsaharienne. Il provoque jusqu'à 70 pour cent de pertes de récolte. Une méthode de lutte proposée combine des pièges à phéromones et des spores de champignon entomopathogène : un mélange de phéromones particulièrement attractif pour les mâles de <i>B. fusca</i> est disposé dans des boîtes à l'entrée des champs. Les mâles s'accouplent en s'approchant des boîtes, puis les femelles, qui se trouvent elles-mêmes contaminées par des spores du champignon. Elles pondront, et ces spores s'attacheront aux jeunes larves qui mourront.	Les mâles de <i>B. fusca</i> pénétrant dans le piège, attirés par les phéromones, et entrent en contact avec des spores du champignon en explorant l'intérieur du dispositif. Ils en ressortent couverts de spores, notamment au niveau des parties génitales. Ils s'accouplent ensuite avec des femelles, qui se trouvent elles-mêmes contaminées par des spores du champignon. Elles pondront, et ces spores s'attacheront aux jeunes larves qui mourront.	filaments mycélium et synthétisent des chitinasés et des protéases, enzymes qui inhibent la formation de la cuticule, voire la détruisent. Dès lors, le mycélium pénètre dans le corps de l'insecte, provoquant l'hémolyse (le « sang » de l'insecte), et libère des toxines qui tuent l'animal.	La cascade de contamination provoquée par le piège entraîne finalement la mort des mâles et des femelles, mais aussi celle des larves. Cette technique permet de réduire de près de 75 pour cent les pertes dans des plantations en laboratoire. Elle doit maintenant être testée dans des champs cultivés.

ticuliers, les baculovirus, pathogènes seulement pour les invertébrés : des nématodes (de petits vers) des genres *Steinernema* et *Heterorhynchus*, qui parasitent les larves d'insectes ravageurs dans le sol.

Quant à la lutte contre les mauvaises herbes, elle mobilise essentiellement des insectes et parfois des pathogènes. Ainsi, on cherche à mettre en place un programme de lutte biologique contre l'ambrosie, ou ambrosie à feuilles d'armoise, qui s'est récemment propagée en France et en Europe. Cette mauvaise herbe venue d'Amérique du Nord a un pollen allergisant et envahit tous les sols nus, empêchant leur colonisation par des plantes indigènes.

Divers auxiliaires (insectes ou champignons phytopathogènes) sont actuellement testés.

Notons qu'un même organisme peut être utilisé dans certaines circonstances, nuisible dans d'autres. Ainsi, le virus de la myxomatose a été employé pour endiguer les pullulations de lapins (notamment en Australie, où ils ont été introduits par un chasseur en 1959), mais il est également nuisible pour les animaux d'élevage. Pour s'en prémunir, le Laboratoire français Bio Espace a développé une méthode de vaccination originale : des puces aux pièces buccales chargées d'un vaccin antimyxomatose ont été lâchées dans la nature ; lorsqu'elles sucent le sang des lapins, elles les vaccinent, ce qui permet d'éviter la propagation de la maladie.

LA LUTTE BIOLOGIQUE EST APPARUE

en Égypte, environ 2000 ans avant notre ère : le chat y a été domestiqué pour lutter contre les rongeurs.

Cette technique peut être élargie à la lutte contre d'autres maladies, éventuellement transmissibles de l'animal à l'homme, telle la grippe aviaire. Toutefois, elle n'a pour l'instant été appliquée avec succès que lors de tests dans les années 1990.

Enfin, les auxiliaires peuvent être les organismes nuisibles eux-mêmes, préalablement transformés par l'homme : c'est la lutte autoïde. De nombreux mâles, stérilisés au moyen de rayonnements ionisants, sont lâchés dans la nature et entrent en compétition avec les mâles sauvages pour les accouplements. De multiples femelles ne pondent alors pas d'œufs fertiles, d'où une réduction significative, voire une extinction, de la population cible. Cette technique a notamment connu un franc succès aux États-Unis, dans les années 1990, pour éliminer la lucilie bouchère (*Cochliomyia hominivorax*), petite mouche dont les larves attaquent au bétail et rendent le cuir inutilisable. Des lâchers massifs de mâles stériles ont entraîné le déclin, voire l'extinction locale, de cette mouche. De même, elle est employée en Afrique depuis 1990 contre la mouche tsé-tsé. Elle s'est révélée efficace en Tanzanie, au Burkina Faso et au Zimbabwe, où les populations de cette mouche se sont réduites drastiquement, avant d'être étendue à la plupart des pays africains confrontés au même problème. Son application se poursuit aujourd'hui.

Les auxiliaires peuvent être introduits dans le milieu où sévit un organisme indésirable de trois façons : en un seul lâcher (lutte biologique classique) ou stratégie d'introduction progressive (lutte biologique autoïde).

La lutte par augmentation est la plus utilisée. Les auxiliaires sont des micro-organismes, ou ils ne s'acclimatent pas ou peu à leur nouveau milieu (d'où la nécessité de les réintroduire sans cesse). La sensibilisation du public à l'agriculture biologique a récemment popularisé la lutte par conservation et modifications environnementales, de loin la plus facile à mettre en œuvre, car les auxiliaires arrivent tout seuls. Dans les

production d'acclimation), en plusieurs lâchers (on parle de lâchers inondatifs, et la lutte biologique est dite par augmentation) et sans lâchers compromettant l'installation autonome des auxiliaires en aménageant les espaces cultivés, par exemple en plantant des haies qui leur servent d'abris ; on parle de lutte biologique par conservation et modifications environnementales).

La lutte par augmentation est la plus utilisée. Les auxiliaires sont des micro-organismes, ou ils ne s'acclimatent pas ou peu à leur nouveau milieu (d'où la nécessité de les réintroduire sans cesse). La sensibilisation du public à l'agriculture biologique a récemment popularisé la lutte par conservation et modifications environnementales, de loin la plus facile à mettre en œuvre, car les auxiliaires arrivent tout seuls. Dans les

AIDER LE PARASITOÏDE À CIBLER L'ORGANISME NUISIBLE

Les parasitoïdes naissent à l'intérieur d'un autre organisme, qu'ils tuent en se développant. Au préalable, la mère doit détecter un hôte dans lequel pondre ses œufs. Elle se fonde en général sur les composés chimiques présents sur la cuticule (la « peau ») des insectes qu'elle rencontre. Cette capacité de reconnaissance étant un facteur clé de l'efficacité des parasitoïdes pour les programmes de lutte biologique, on cherche à développer artificiellement.

On doit pour cela identifier les substances en jeu. C'est ce qu'a fait l'auteur de cet article, avec ses collègues du CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical), au début des années 2000. L'étude concernait la cochenille du manioc (*Phenacoccus herreni*), important ravageur du manioc en Amérique latine (a). La guêpe parasitoïde *Aenasius vexans* est utilisée pour lutter contre ce ravageur. Les composés synthétisés par l'insecte ont été isolés et analysés par chromatographie en phase li-

quide couplée à un spectromètre de masse. Sur le chromatogramme, les différents composés apparaissent comme des pics. L'un d'eux correspondait à un composé suspectait d'être particulièrement attractive pour le parasitoïde.

Pour le confirmer, on a synthétisé ce composé à partir d'acide caféoyl et de sérine. Le composé a ensuite été déposé sur une balle de coton (imitant le corps de la cochenille) :

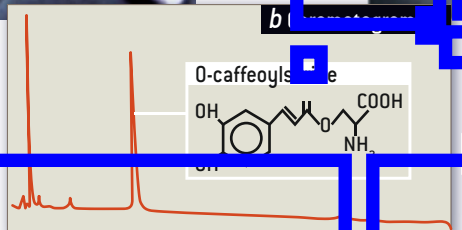
le parasitoïde *A. vexans* s'est immédiatement dirigé vers cette balle.

On pourra alors exposer ce parasitoïde à l'O-caféoylsérine en insecticide avant son lâcher, afin d'augmenter sa sensibilité à cette molécule. Une méthode similaire a été appliquée avec succès en Californie en 1997 pour le contrôle de la cochenille des citruses *Aonidiella aurantii* : l'hormone sexuelle *tylosin*, un parasitoïde de cette cochenille, a été exposé préalablement à l'O-caféoyltyrosine.



Lâcher du parasitoïde préalablement exposé au composé attractif identifié, sur les cochenilles.

Identification d'un composé potentiellement attractif présent sur la cuticule de la cochenille.



Dépôt du composé sur une balle de coton pour vérifier qu'il attire le parasitoïde.

Pour augmenter l'efficacité d'une campagne de lutte biologique, une stratégie consiste à identifier les composés chimiques qui attirent le parasitoïde vers son hôte, à synthétiser artificiellement

ces composés et à y exposer les parasitoïdes avant les lâchers. Cette stratégie a notamment été appliquée à la cochenille du manioc, un insecte ravageur.

autres cas, des infrastructures sont nécessaires pour les faire se multiplier.

La définition de la lutte biologique par l'OILB, qui évoque « l'utilisation d'organismes vivants ou de leurs produits », est sujette à interprétation. Elle semble inclure les produits dérivés d'organismes vivants dans les armes de la lutte biologique. Ce sont par exemple des extraits de plante, tel le purin d'orties (obtenu en hachant et en faisant macérer des orties), ou des toxines copiées sur celles synthétisées par des organismes naturels, telle la bactérie *Bacillus thuringiensis* ; ces deux techniques sont utilisées pour lutter contre les ravageurs. Toutefois, certains scientifiques refusent le rattachement de ces produits à la lutte biologique au sens strict et préfèrent parler d'agrochimie.

Des frontières floues

D'autres techniques se sont développées aux frontières de la lutte biologique. C'est le cas des luttes par confusion sexuelle et par utilisation de régulateurs de croissance, souvent employées en agriculture biologique. La première consiste à empêcher les deux sexes de se rencontrer en brouillant leurs communications par la diffusion de phéromones sexuelles. Dans la seconde, on pulvérise des analogues d'hormones, qui perturbent la croissance et le développement des insectes. Malformés, ceux-ci ne peuvent se reproduire. Dans les deux cas, il n'y a donc pas de descendance. Certains considèrent que ces techniques ne font pas partie de la lutte biologique, puisqu'elles n'utilisent pas d'organismes antagonistes, mais des produits chimiques (souvent synthétiques).

La création de certaines plantes génétiquement modifiées (des OGM) est également à la frontière de la lutte biologique. On ne parle pas ici d'organismes tels que le maïs transgénique commercialisé par la firme *Monsanto* : ce maïs a été modifié pour être résistant au *Roundup*, un herbicide, afin qu'on puisse le pulvériser sur les cultures. Or la lutte biologique consiste justement à éviter l'utilisation d'herbicides. Ainsi, depuis le début des années 1980, on a inséré dans certaines plantes des gènes codant des toxines, afin de les rendre naturellement toxiques pour les insectes ravageurs. On a notamment utilisé des gènes de *Bacillus thuringiensis*, une bactérie bien connue dans la lutte biologique, qui a longtemps été répandue directement sur les cultures.

Nous reviendrons sur ces promesses des OGM. Au lieu de lutte biologique, on parle souvent de lutte par amélioration génétique à l'instar de la sélection variétale (on sélectionne les variétés présentant des caractéristiques intéressantes).

La lutte biologique a plusieurs avantages par rapport à la lutte chimique : elle ne détruit pas l'environnement, ne pollue pas et permet une régulation à long terme des organismes nuisibles. Cependant, elle est parfois inefficace, lorsque les auxiliaires ne parviennent pas à s'adapter à leur nouvel environnement et disparaissent rapidement. Par ailleurs, même lorsqu'ils l'utilisent, certains agriculteurs continuent souvent à pulvériser des insecticides, nuisibles non seulement aux ravageurs, mais aussi aux auxiliaires. Le bon fonctionnement de la lutte biologique passe donc par une gestion globale des méthodes de lutte contre les organismes nuisibles.

En outre, la lutte biologique n'est pas sans risque : dans certains cas, les auxiliaires s'adaptent si bien à leur région d'introduction qu'ils se prolifèrent et deviennent aussi nuisibles que leurs cibles. Ainsi, le bulbul orphée *Myiophobus jocosus*, un petit passereau indien ainsi nommé merle de Maurice, a été introduit en 1892 sur l'île Maurice pour réguler les populations d'insectes ravageurs de la canne à sucre. Il est entré en compétition avec certaines espèces d'oiseaux endémiques et est devenu un grand pillier d'arbres fruitiers. Des campagnes de capture sont en cours sur l'île afin de limiter sa population.

Malgré d'autres exemples existent. En Jamaïque, un programme de lutte biologique contre des rats a mené à l'introduction successive de quatre espèces (fourmis de feu tropicales, furets, crapauds, buffles et mangoustes), chacune devant lutter contre celle qui l'avait précédée, qui avait proliféré et menacé l'écosystème local !

Il est donc de plus en plus clair que la lutte biologique doit prendre en compte le contexte global, c'est-à-dire que le comportement et la biologie des différents protagonistes doivent être préalablement étudiés. Avant de lâcher un auxiliaire dans un nouvel environnement, il faut s'assurer qu'il va pouvoir s'adapter et qu'il ne va pas s'attaquer à des organismes non ciblés, devenant à son tour nuisible.

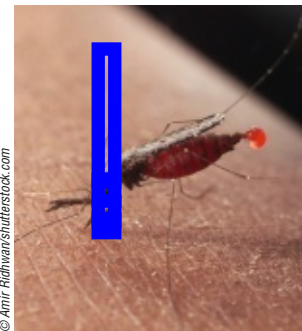
Ces études aboutissent aussi à des stratégies améliorant l'efficacité de la lutte biologique. Ainsi, la compréhension des mécanismes qui attirent un parasitoïde vers

Agriculture bio et lutte biologique, quel rapport ?

L'agriculture biologique favorise les méthodes naturelles dans le contrôle d'organismes nuisibles, mais elle ne se limite pas à la lutte biologique : elle comprend aussi, par exemple, des techniques de fertilisation des sols fondées sur des produits naturels, tel le compost.

Inversement, la lutte biologique ne concerne pas que l'agriculture : elle est utilisée contre les insectes vecteurs de maladies, tels les moustiques.

(ci-dessous, un moustique anophèle, vecteur du paludisme).



© Amir Ridwan/shutterstock.com

son hôte permet d'accroître cette attraction (voir l'encadré page 46). Autre exemple, l'autodissémination : on attire l'insecte nuisible dans un dispositif contenant un micro-organisme pathogène, par exemple en diffusant des phéromones sexuelles, et l'insecte contaminé dissémine la maladie (voir l'encadré page 45). Cette technique présente l'avantage de cibler l'insecte visé, grâce à l'utilisation de phéromones spécifiques en tant qu'attractif. Elle a été utilisée pour la première fois dans les années 1990 et a pris un nouvel essor dans les années 2000. Elle a notamment été appliquée sur une file du lac Victoria, au Kenya, par l'ICIPE : la population de mouches tsé-tsé a chuté de plus de 80 pour cent.

Par ailleurs, la lutte biologique cherche de plus en plus à tirer parti des OGM. Lorsqu'une plante est attaquée par un ravageur, elle émet des composés chimiques particuliers, qui attirent les parasitoïdes de l'insecte. Certaines variétés cultivées ont totalement perdu ou presque cette capacité, vraisemblablement à la suite des sélections opérées par l'homme. L'idée est donc de leur faire retrouver cette capacité. On tente ainsi d'accroître leur attractivité pour les parasitoïdes, grâce à l'insertion d'un ou de plusieurs gènes.

Des OGM contre le paludisme

Les OGM pourraient aussi servir à lutter contre le paludisme. Cette maladie est causée par un parasite unicellulaire du genre *Plasmodium* et propagée par des moustiques du genre *Anopheles*. Lorsque le moustique ingère du sang infecté, il absorbe des gamètes mâles et femelles du parasite, qui se fécondent dans son intestin. Après maturation, le parasite traverse la paroi intestinale, passe dans l'hémolymphe (l'équivalent du sang chez les arthropodes), puis se loge dans les glandes salivaires du moustique, d'où il sera transmis à un autre organisme lors d'une prise alimentaire ultérieure.

Des chercheurs américains de diverses universités tentent de neutraliser le parasite dans l'intestin du moustique. Certains voudraient créer des moustiques à la paroi intestinale renforcée, afin que le parasite ne puisse plus la traverser, tandis que d'autres modifient génétiquement les bactéries symbiotiques vivant dans l'intestin pour qu'elles attaquent le

L'AUTEUR



Paul-André CALATAUD est chercheur à l'Institut de recherche pour le

développement (IRD) et affecté au Centre international de physiologie et d'écologie des insectes (ICIPE), au Kenya.

BIBLIOGRAPHIE

S. Wang et al., Fighting malaria with engineered bacteria from vector mosquitoes, *PNAS*, vol. 109, pp. 12734-12739, 2012.

N. Manian et al., Dissemination of *Busseola fusca* male as vector, *Biological Control*, vol. 58, pp. 374-378, 2011.

L. Suty, La lutte biologique : vers de nouveaux équilibres écologiques, *Quæ*, 2010.

Collectif, Pesticides, agriculture et environnement, *Quæ*, 2011.

P. A. Calataud et al., Identification and synthesis of a pheromone mediating host location by two parasitoid species of the cassava mealybug *Phenacoccus manihoti*, *Journal of Chemical Ecology*, vol. 27, pp. 2203-2217, 2001.

SUR LE WEB

Site de l'INRA sur la lutte biologique : www.inra.fr/opie-insectes/luttebio.htm

parasite. Les moustiques ne contamineraient ainsi plus leurs proies. À terme, on souhaite remplacer dans la nature les moustiques sauvages par les moustiques modifiés. Mais pour cela, ces derniers doivent se reproduire plus vite que les autres, ce qui n'est pas encore le cas...

L'utilisation de tels OGM devra se faire dans un cadre légal strict. De façon générale, la lutte biologique doit respecter plusieurs obligations juridiques. D'une part, la détention, la circulation, l'importation et l'exportation d'insectes et de plantes sont soumises à un certain nombre de conditions afin de ne pas nuire à la biodiversité locale, conformément à la Convention sur le commerce international de espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (CITES). D'autre part, toutes les étapes (prélèvement, importation et introduction) doivent faire l'objet de demandes officielles préalables auprès des pays concernés.

Vers une lutte intégrée

Outre les recherches visant à accroître l'efficacité de la lutte biologique, on combine de plus en plus cette stratégie avec d'autres, telles que la lutte physique. Cette dernière est fondée sur une multitude de méthodes : désherbage manuel, brûlage des mauvaises herbes... D'autres stratégies consistent à adapter le système de culture, afin de limiter les attaques de ravageurs, notamment par les rotations de culture et des dates de semis et de récolte appropriées (par exemple, on récolte avant que les ravageurs ne soient très présents). Certains préconisent d'adoindre la lutte chimique à cet arsenal, même si je n'adhère pas à cette position. En conséquence, on parle de plus en plus de lutte intégrée.

Les pesticides disparaîtront-ils totalement à moyen terme ? C'est peu probable. Ils restent l'arme la plus utilisée pour la protection des cultures, car ils sont souvent moins coûteux et moins gourmands en temps de travail que la lutte biologique. En outre, celle-ci n'est pas toujours assez efficace pour combattre les ravageurs. Cependant, on cherche de plus en plus à limiter l'utilisation des pesticides, d'une part, en surveillant mieux les ravageurs (de façon à ne traiter les cultures qu'en cas de nécessité), et, d'autre part, en développant des stratégies alternatives. Ainsi, la lutte biologique prend de plus en plus d'importance. ■

Rendez-vous sur

POUR LA
SCIENCE 

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

- Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques au quotidien.
- Écoutez nos entretiens audio ou téléchargez-les.
- Recevez nos lettres d'information et réagissez aux articles en vous inscrivant sur www.pourlascience.fr/newsletters
- Consultez les archives de tous nos magazines depuis 2004.
- Accédez aux numéros numériques compris dans votre abonnement en créant votre compte.
- Suivez notre actualité en direct :



<http://www.pourlascience.fr/rss>



<http://twitter.com/pourlascience>



<http://www.pourlascience.fr/pls-facebook>

+ de 10 000 fans 



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

Le langage des

Terry Sejnowski
et Tobi Delbruck

La communication cérébrale repose sur une chronologie précise des signaux électriques transmis d'un neurone à l'autre

Notre cerveau est plus performant que Google ou que le meilleur des robots du film *iRobot*. Du moins pour certaines tâches... Il est capable d'effectuer instantanément des recherches parmi une multitude d'expériences et d'émotions. En une fraction de seconde, nous reconnaissons le visage d'un parent, d'un ami ou d'une ancienne connaissance, même dans une semi-obscurité, et quel que soit l'angle d'observation – une tâche que les systèmes robotiques les plus perfectionnés peinent à accomplir. Nous sommes aussi multitâches : nous pouvons sortir un mouchoir de notre poche et nous essuyer le front tout en discutant. Or un « cerveau électronique » qui permettrait à un robot de réaliser cette simple combinaison de comportements reste une perspective éloignée.

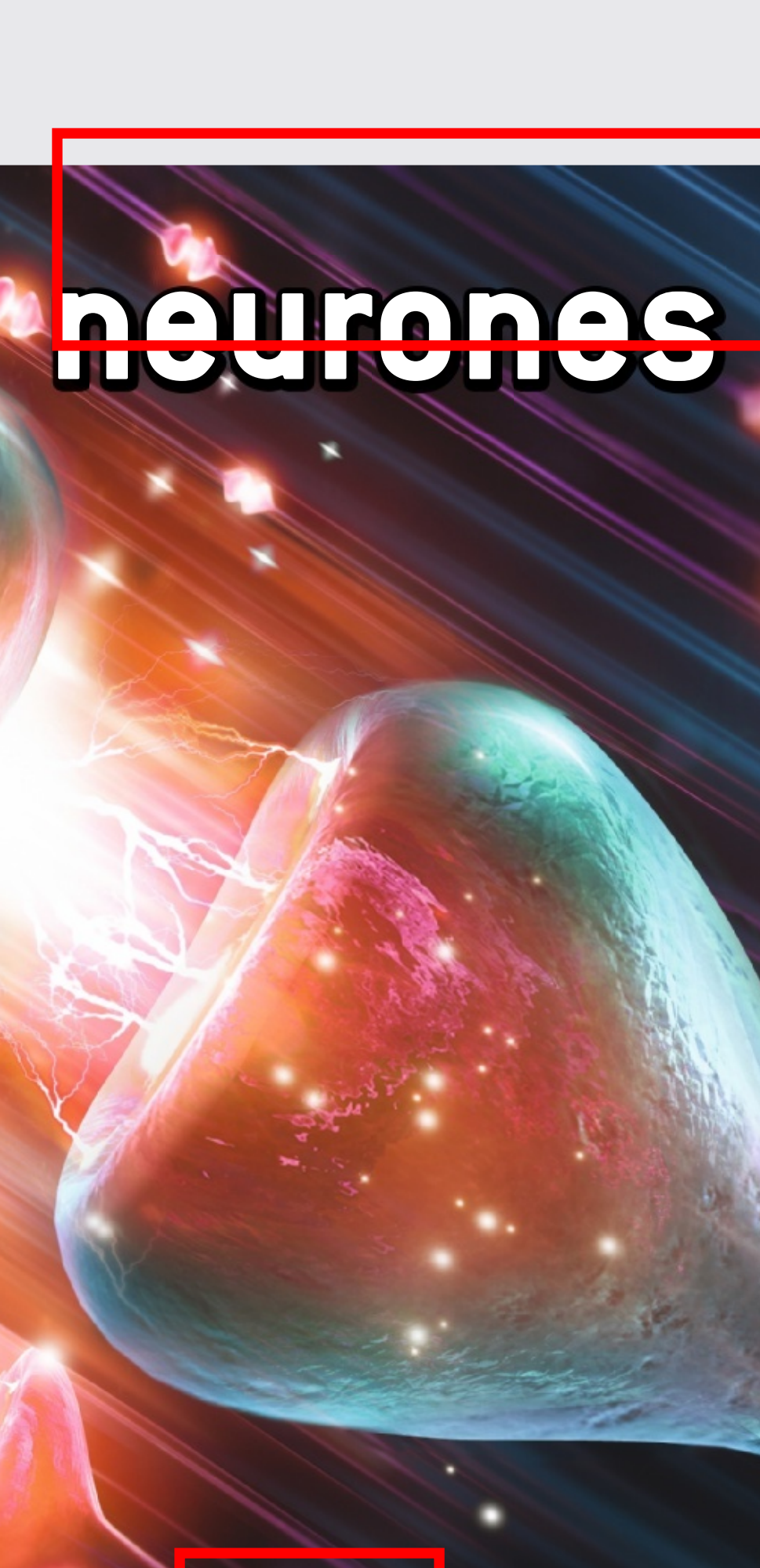
Comment le cerveau réalise-t-il ces performances, sachant que la complexité de ses réseaux, où des milliards de neurones forment des milliers de milliards de connexions, rivalise avec celle d'Internet ? En partie grâce à son efficacité énergétique : lorsqu'une cellule nerveuse communique avec une autre, le cerveau consomme un million de fois moins d'énergie qu'un ordinateur effectuant l'opération équivalente. Cet

L'ESSENTIEL

■ La chronologie de signaux électriques (les potentiels d'action) échangés entre neurones au travers de multiples points de contact (les synapses) est un élément essentiel de la communication cérébrale.

■ Ainsi, la fréquence moyenne d'émission de potentiels d'action et les intervalles entre ces derniers sont des porteurs d'information.

■ En outre, des signaux d'entrée identiques peuvent déclencher ou non la décharge d'un neurone cible, selon leurs instants d'arrivée relatifs.



neurones

organe de moins de un kilogramme et demi aurait ainsi acquis, au cours de l'évolution, un fonctionnement «économe en énergie».

Cependant, ce bon rendement ne peut expliquer à lui seul les performances du cerveau, qui présente par ailleurs de nombreuses limites intrinsèques. Ainsi, un neurone du cortex cérébral met plusieurs millisecondes à réagir (sous forme d'une impulsion électrique, ou potentiel d'action) au signal d'un autre neurone, une vitesse d'escargot comparée à celle des transistors : utilisés comme interrupteurs dans les circuits électroniques des ordinateurs, ces composants commutent en quelques milliardièmes de seconde. En outre, le réseau neuronal est peu fiable, le signal se perdant souvent en cours de route.

La façon dont le cerveau extrait des informations de l'ensemble des signaux qui le parcourent est mal comprise. Cependant, avec d'autres scientifiques, nous avons récemment montré comment le cerveau tire parti de la chronologie précise des potentiels d'action pour coder l'information, ce qui permet de traiter des problèmes difficiles en un temps record. En effet, des assemblées de neurones synchrones transfèrent beaucoup plus efficacement l'information qu'une même cohorte de neurones désorganisés temporellement (mode asynchrone). Outre leur intérêt théorique, nos travaux pourraient conduire à la conception d'ordinateurs d'un nouveau genre. On a déjà construit des circuits électroniques «neuromorphiques», qui imitent certains aspects du réseau cérébral. Ces dispositifs sont parfois constitués d'un million de neurones électroniques et des systèmes de plus grande taille sont prévus. À terme, on espère construire des calculateurs neuromorphiques qui fonctionnent beaucoup plus vite que les ordinateurs modernes, tout en consommant moins d'énergie.

Comme de nombreux autres neuroscientifiques, nous utilisons souvent le système visuel comme banc d'essai, notamment parce que son schéma de câblage est assez bien connu. On soupçonne depuis longtemps que dans ce système et d'autres, la chronologie des signaux est un élément essentiel du mode de communication cérébral. Pendant plusieurs décennies, on a négligé cette idée; elle nécessitait en effet de comparer l'activité de différentes

LES SYNAPSES SONT DES CONNEXIONS
entre deux neurones. Elles régulent
la circulation des informations dans le cerveau.

Kenn Brown, Mondolith Studio

parties du cerveau, mais il était difficile de mesurer l'activité de plus d'un neurone à la fois. Toutefois, divers travaux expérimentaux et théoriques, ainsi que le développement de modèles numériques du système nerveux, l'ont remise sur le devant de la scène.

Les cellules cérébrales reçoivent toutes sortes de signaux d'entrée, à différentes échelles de temps. Les hormones, véhiculées par le sang, circulent lentement. Pour les réponses rapides, les signaux les plus importants de la communication cérébrale sont les potentiels d'action, de brèves variations du potentiel électrique membranaire qui se propagent dans le réseau neuronal. Les impulsions utilisées pour la communication entre neurones durent quelques millisecondes. Chaque neurone reçoit de nombreux signaux d'entrée. Quand la somme de «entrées» qui tendent à l'activer dépasse la somme de celles qui tendent à l'inhiber, le neurone émet un potentiel d'action. Ce dernier court le long de l'axone (une extension du neurone jouant le rôle de câble électrique) jusqu'à ses extrémités. Le signal est ensuite transmis par voie chimique à travers des jonctions nommées synapses, qui relient l'extrémité de l'axone aux cellules réceptrices.

100 millions de photorécepteurs

Dans la rétine de chaque œil, 100 millions de photorécepteurs captent les variations de la lumière. Les signaux qu'ils émettent traversent plusieurs couches de neurones, puis sont convertis en séquences de potentiels d'action par un million de cellules ganglionnaires, situées à l'arrière de la rétine. Ces potentiels d'action sont transmis par des axones à diverses parties du cerveau, qui envoient à leur tour des signaux à d'autres régions et engendrent finalement une perception consciente du signal visuel. Chaque axone peut transmettre plusieurs centaines de potentiels d'action par seconde, bien qu'il n'en véhicule le plus souvent que quelques-uns par seconde. Tout ce que nous voyons (les formes, les couleurs et les mouvements) est encodé dans cette «rivière» de potentiels d'action espacés d'intervalles de temps variables.

L'enregistrement simultané de l'activité de nombreux neurones est essentiel

pour comprendre le fonctionnement du cerveau, mais il est extrêmement difficile à réaliser. Lors de travaux publiés en 2010, Eduardo Salkin et ses collègues de l'Institut Salk d'études biologiques, à La Jolla, en Californie, ont enregistré simultanément les potentiels d'action de centaines de cellules ganglionnaires voisines dans des rétines de singe. Ces travaux ont permis d'identifier les photorécepteurs qui communiquent avec chaque cellule ganglionnaire. De tels progrès dans les techniques de mesure devraient nous aider à déchiffrer le code utilisé par le cerveau pour véhiculer les informations.

Les neurobiologistes utilisent plusieurs méthodes pour déceler la signification des

TOU... CE QUE NOUS VUYONS (les formes, les couleurs et les mouvements) est encodé dans cette «rivière» de potentiels d'action.

trains de potentiels d'action provenant de la rétine. L'une d'elles consiste à compter les potentiels d'action dans chaque axone pendant une période donnée : plus leur fréquence est élevée, plus le signal est intense. Certaines informations visuelles, telle la distribution locale du contraste, sont codées par des variations de cette fréquence et véhiculées par des groupes spécifiques de neurones.

Les informations sont également codées par la chronologie relative des potentiels d'action émis par plusieurs neurones. Les cellules ganglionnaires de la rétine, par exemple, sont sensibles à l'intensité lumineuse et répondent à une scène visuelle changeante en transmettant des potentiels d'action à diverses parties du cerveau. Chaque cellule ganglionnaire peut être activée par une caractéristique physique particulière d'un objet (par exemple, sa couleur ou son orientation). Lorsque plusieurs d'entre elles sont activées de façon quasi simultanée, le cerveau interprète cette simultanéité comme le signe de la détection d'un attribut particulier du même objet. Horace Barlow, de l'Université de Cambridge, a qualifié ces activations simultanées de «coïncidences suspectes».

Des ingénieurs essaient de tirer parti de ces découvertes pour créer des systèmes d'enregistrement d'images plus efficaces, qui intègrent le principe de codage par la chronologie relative des signaux. L'un de nous (T. Delbruck) a

mis au point une caméra émettant des impulsions électriques en réaction aux variations de luminosité. Elle permet de filmer des objets rapides d'un seul coup, avec un traitement du signal minimal (voir l'encadré).

De la rétine au cortex

Divers travaux ont confirmé que le cortex visuel s'appuie sur des indices temporels pour comprendre ce que voient les yeux. Les cellules ganglionnaires de la rétine n'ont pas de projections directes dans le cortex, mais elles lui sont reliées *via* le thalamus, situé au cœur du cerveau. Quelque 100 millions de cellules s'activent alors dans chaque cortex visuel (localisé à l'arrière de chaque hémisphère cérébral). Puis les signaux sont envoyés à d'autres régions du cerveau pour l'interprétation consciente.

L'examen des connexions entre les neurones relais du thalamus et ceux du cortex visuel nommés neurones étoilés épineux (appartenant à la couche du cortex où arrivent les axones des neurones thalamiques) est riche d'enseignements. En 1997, Kevan Martin, aujourd'hui à l'Université de Zurich, et ses collègues ont découvert que seulement six pour cent des synapses présentes sur chaque neurone étoilé épineux sont issues d'un axone de neurone thalamique. Comment un signal si faible peut-il être transmis de façon fiable à des neurones situés dans les différentes couches du cortex ?

Les neurones du cortex sont très sensibles aux signaux d'entrée fluctuants, auxquels ils peuvent répondre en émettant un potentiel d'action en quelques millisecondes. En 2010, avec Hsi-Ping Wang et Donald Spencer, de l'Institut Salk, et Jean-Marc Fellous, de l'Université de l'Arizona, l'un de nous (T. Sejnowski) a modélisé sur ordinateur un neurone étoilé épineux. Une telle cellule ne peut être activée par un seul potentiel d'action ; en revanche, les potentiels d'action transmis par seulement quatre axones entraînent son activation, à condition qu'ils ne soient espacés que de quelques millisecondes. Lorsque les signaux d'entrée proviennent du thalamus, il suffit qu'un petit sous-groupe de neurones du cortex visuel soit activé pour représenter le contour et la texture d'un objet. Chaque neurone étoilé épineux répond préférentiellement à un

stimulus visuel donné (traduit en potentiels d'action), tel que l'orientation d'un objet.

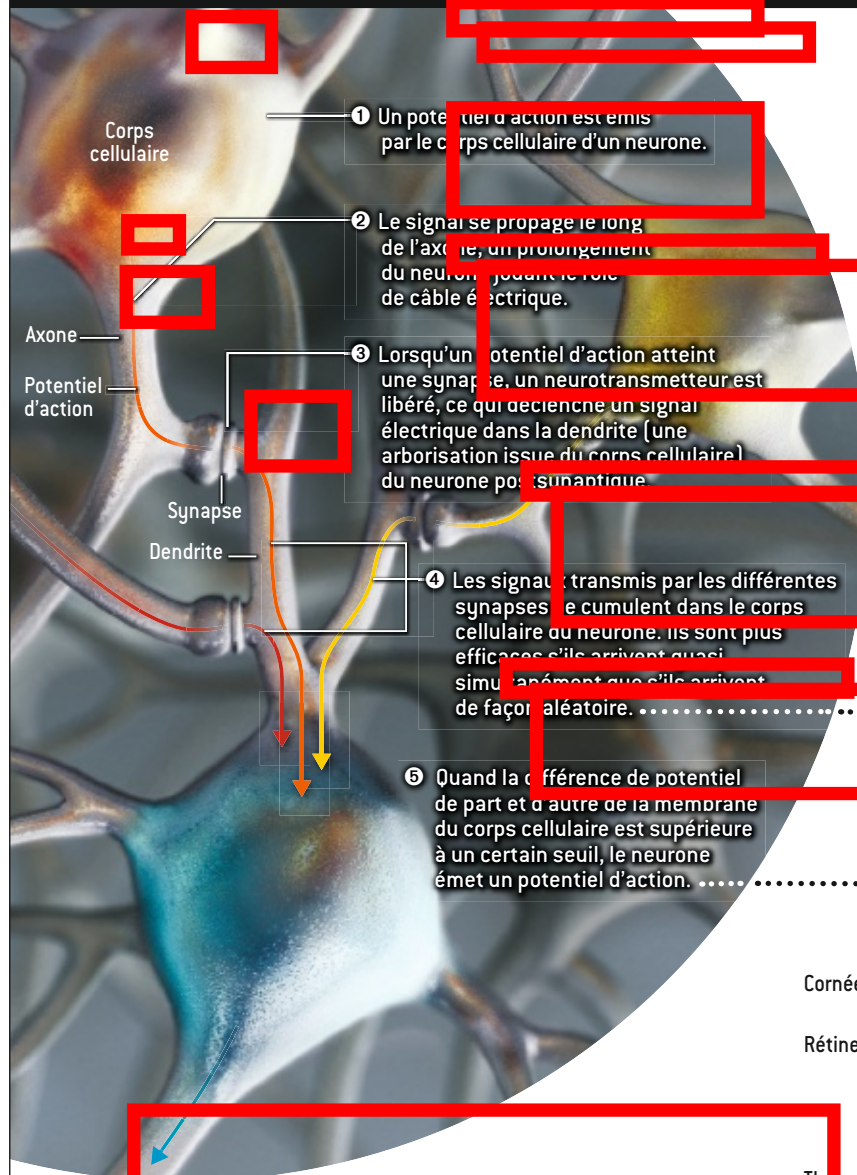
Dans les années 1960, David Hubel, de la Faculté de médecine de Harvard, et Torsten Wiesel, aujourd'hui à l'Université Rockefeller, ont découvert qu'un neurone du cortex ne répond intensément à son stimulus préférentiel que si l'objet correspondant se situe dans une zone particulière du champ visuel, nommée champ récepteur du neurone. Les neurones liés à la fovéa (la région cen-

trale de la rétine) ont les plus petits champs récepteurs, environ de la taille de la lettre e sur ce page. C'est un peu comme si chacun des neurones observait le monde à travers une paille. Dans les années 1980, John Alkon, de l'Institut de technologie de Californie (Caltech), a montré que la présence de divers stimulus dans la périphérie « silencieuse » du champ récepteur peut influencer la fréquence d'activation des neurones corticaux en réponse à un

stimulus situé dans leur champ récepteur. L'information issue du pourtour du champ récepteur permet ainsi au neurone de moduler sa réponse en fonction du contexte général.

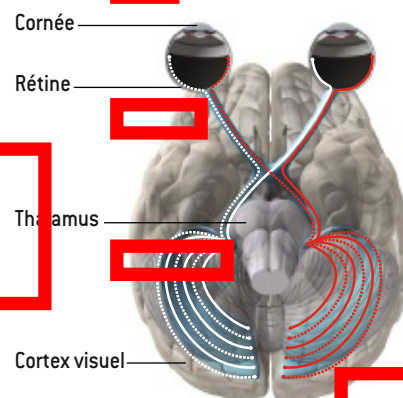
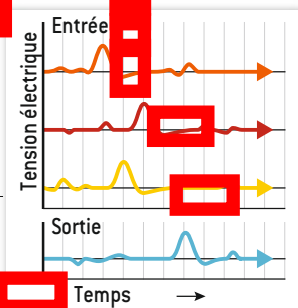
Le pourtour du champ récepteur n'influe pas seulement sur la fréquence moyenne, mais aussi sur la précision temporelle de la décharge neuronale, autrement dit sur les instants d'émission des potentiels d'action. Lors d'une expérience récente, David McCormick et ses collègues de l'Université Yale

LA VOIE RAPIDE DE LA COMMUNICATION CÉRÉBRALE



Les potentiels d'action sont de brèves variations de la différence de potentiel qui règne de part et d'autre de la membrane d'un neurone. Ils durent quelques millisecondes et se propagent dans les axones, du corps cellulaire d'un neurone jusqu'à d'autres neurones. Ces signaux permettent au cerveau de vite réagir à un événement. Leur coordination dans le temps augmente l'efficacité du réseau cérébral qui comporte des milliers de milliards de connexions entre neurones.

Les potentiels d'action (ci-dessous) qui parviennent à un neurone dans une étroite fenêtre temporelle de quelques millisecondes sont en mesure d'activer ce neurone.



Lors de la perception visuelle d'un objet, des impulsions sont émises par des neurones de la rétine. Elles passent par la « station-relais » du thalamus, puis parviennent au cortex visuel. Des signaux synchronisés, représentant chacun une caractéristique donnée de l'objet (telle que la couleur ou l'orientation spatiale), sont intégrés dans le cortex, où s'élabore la perception de l'objet.

■ LES AUTEURS



Terry SEJNOWSKI est chercheur à l'Institut médical Howard Hugues et dirige le Laboratoire de neurobiologie computationnelle de l'Institut Salk d'études biologiques, à La Jolla, en Californie.

Tobi DELBRÜCK codirige le groupe sur les capteurs de l'Institut de neuro-informatique, à l'Université de Zurich.

ont projeté un film à des chats et enregistré les réponses de certains neurones de leur cortex visuel. Lorsqu'ils réduisaient l'image du film pour la faire tenir dans le champ récepteur de ces neurones (aucun signal ne provenait de la zone environnante), les instants d'émission des potentiels d'action variaient aléatoirement. En revanche, lorsque les expérimentateurs agrandissaient l'image pour stimuler également la zone entourant la périphérie du champ récepteur, les potentiels d'action étaient moins fréquents, mais leur émission était temporellement plus précise (elle se produisait toujours aux mêmes instants du film). D'autres expériences montrent l'influence du contexte perceptuel sur la fréquence d'émission des potentiels d'action (voir l'encadré page ci-contre).

La chronologie des potentiels d'action est aussi importante pour d'autres processus neuronaux. On pense que leur synchronisation est nécessaire à l'assemblage d'une image à partir de ses différentes composantes (telles que la couleur et l'orientation),

chaque potentiel d'action véhiculant l'une d'elles. Un potentiel d'action codant la propriété «rouge» est par exemple émis de façon synchronisée avec un autre codant un contour arrondi, ce qui permet au cortex visuel de fusionner ces signaux pour créer une image mentale de pot de fleurs.

Les neurones corticaux qui reçoivent les signaux d'entrée visuels ont aussi des interactions excitatrices et inhibitrices avec d'autres neurones corticaux. Un grand nombre de ces derniers, distants les uns des autres, s'activent spontanément et périodiquement à des fréquences inférieures à 100 hertz. Cela permettrait de coordonner les multiples neurones responsables de la perception visuelle.

L'attention, facette essentielle de la cognition, semble aussi fondée sur des séquences de potentiels d'action synchronisés. Celle-ci renforcerait l'importance d'une perception ou d'un souvenir atteignant la conscience. Robert Desimone, aujourd'hui à l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), et ses collègues ont étudié ce phénomène sur des singes : lorsque ces derniers prêtent attention à un stimulus donné, il en résulte une augmentation du nombre de neurones corticaux émettant des potentiels d'action synchronisés à des fréquences situées dans la bande gamma (30 à 80 hertz), ainsi qu'une augmentation du rythme d'émission.

Quant la rétine inspire un nouveau type de caméra

Les caméras numériques traditionnelles sont peu efficaces. Elles enregistrent 24 images par seconde (une toutes les 40 millisecondes), chacune étant composée d'un mosaïque de pixels. Chaque pixel reçoit une quantité moyenne de lumière pendant les 40 dernières millisecondes, le temps mis pour une balle de tennis pour parcourir environ 1,5 mètre. Ainsi, les caméras produisent une avalanche de données, nécessitant un temps de traitement très long. Avec ses collègues de l'Institut de neuro-informatique de

l'Université de Zurich (INI), l'un des auteurs (T. Delbruck) a alors développé un nouveau type de caméra, qui imite la façon dont certaines parties de la rétine encodent des images pour le cerveau.

La caméra DVS, pour *Dynamic Vision Sensor*, la caméra ne détecte que les parties d'une scène qui varient d'une image à l'autre. Les pixels se comportent comme

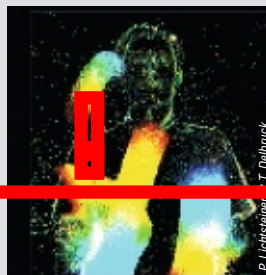
des cellules rétiniennes : ils émettent une impulsion électrique quand la luminosité change.

Ainsi, la caméra peut filmer des objets qui se déplacent en enregistrant très peu de données. Elle capte un changement d'intensité lumineuse en une microseconde, de sorte qu'elle peut suivre des

objets en mouvement. Les caméras ordinaires, qui enregistrent une image toutes les 40 millisecondes.

La caméra DVS pourrait jouer un rôle de sentinelle, détectant les anomalies : voiture, piéton, personne âgée qui glisse et qui tombe. Elle a déjà été incorporée dans divers dispositifs robotiques : système placé devant un robot de but pour empêcher les balles d'entrer, dispositif tenant un crayon en équilibre, véhicule autonome. Les capteurs qui détectent des particules dans des écoulements.

L'approche consistant à ne réenregistrer que ce qui change dans une scène visuelle est également utilisée pour d'autres applications. Des chercheurs de l'Université Cornell ont ainsi élaboré une prothèse de rétine qui fonctionne sur ce principe.



La caméra DVS n'enregistre que les parties changeantes d'une scène, en détectant les variations de luminosité sur chaque pixel. De telles variations se produisent par exemple lorsqu'un enfant bouge (à gauche). Sur l'image du jongleur (à droite), les mouvements de balle récents apparaissent en rouge et les plus anciens en bleu.

Synchronisation et maladies mentales

L'étude de cette bande de fréquences pourrait aussi se révéler utile pour comprendre l'autisme et la schizophrénie. En effet, les électroencéphalogrammes, qui mesurent des variations de potentiel électrique à la surface du crâne résultant de l'activité d'un grand nombre de neurones, enregistrent des oscillations aux fréquences de la bande gamma. Or ces oscillations sont moins amples chez les patients atteints de schizophrénie ou d'autisme. David Lewis, de l'Université de Pittsburgh, Margarita Behrens, de l'Institut Salk, et d'autres chercheurs ont incriminé des neurones corticaux nommés cellules à panier qui participent à la synchronisation des potentiels d'action : un déséquilibre de l'inhibition ou de l'excitation de ces neurones (eux-mêmes inhibiteurs d'autres neurones) semble réduire l'activité synchronisée dans la bande gamma et pourrait expliquer en partie les troubles neurologiques. Des anomalies

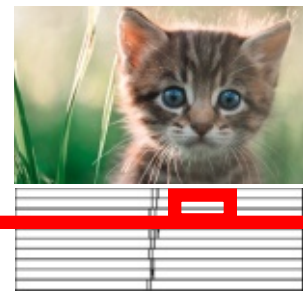
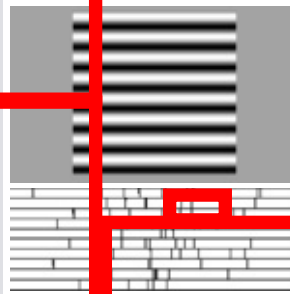
Un codage neuronal optimisé pour les images naturelles ?

Chaque neurone du cortex visuel est sensible à une zone restreinte de l'espace, nommée champ récepteur : seul un stimulus situé dans cette zone peut déclencher l'émission d'un potentiel d'action. Pourtant, le contexte visuel global a une influence sur la précision temporelle du codage, comme l'a montré une étude récente du Laboratoire UNIC (Unité de Neurosciences, Information et Complexité), à Gif-sur-Yvette.

Une électrode a été implantée dans le cortex visuel d'un animal (préalablement anesthésié), afin de mesurer l'activité d'un neurone et de caractériser ses réponses fonctionnelles. La pointe de l'électrode, d'un diamètre de 0,1 micromètre, pénètre dans le corps cellulaire du neurone, dont le diamètre est d'une vingtaine de micromètres. Les réponses du même neurone ont été enregistrées pour deux films distincts, couvrant l'ensemble du champ visuel et présentés dix fois à l'animal : des bandes sombres et

claires alternées qui défilent et une séquence aléatoire d'images « naturelles » (voir la figure ci-contre). Lorsqu'un stimulus (tel qu'une bande noire) passe dans le champ récepteur du neurone, un ou plusieurs potentiels d'action sont émis.

Pour le film composé de bandes, les potentiels d'action sont émis à des instants variables d'une projection à l'autre. Pour le film composé d'images naturelles, les potentiels d'action sont beaucoup moins nombreux mais émis à des instants quasi identiques du film à chaque projection. Ainsi, la réponse du neurone dépend de son environnement perceptuel, en particulier du type d'image (artificielle ou naturelle, simple ou riche en information). Ces résultats suggèrent que le cerveau ajuste la pré-



Des potentiels d'action sont émis en plus grand nombre et de façon plus aléatoire quand des bandes noires et blanches défilent (à gauche) que pour un film composé d'images naturelles (à droite). Sur les diagrammes du bas, chaque bande horizontale correspond à l'enregistrement de l'activité neuronale pour une projection du film et chaque trait à un potentiel d'action.

pour ce type de stimulus, le cerveau fonctionne sur un mode « optimisé » et sans bruit (tous les potentiels d'action sont porteurs d'information).

ficelle calcule-t-elle ? Mais comment dire optimisé : le codage et le rapport signal sur bruit en fonction de l'image à reconnaître ?

doute lors d'une période d'apprentissage précoce. Saura-t-on un jour concevoir un dispositif de vision arti-

Yves Frégnac, professeur en sciences cognitives à l'École polytechnique et directeur du Laboratoire UNIC, au CNRS.

Yves Frégnac, © Shutterstock

similaires dans les circuits du cortex préfrontal pourraient être à l'origine des troubles de la pensée accompagnant la schizophrénie.

Outre l'attention, la mémoire dépendrait aussi de la synchronie des impulsions. Lors de l'enregistrement des souvenirs, la chronologie relative des potentiels d'action semble être aussi importante que la fréquence d'activation. En particulier, l'émission synchronisée de potentiels d'action dans le cortex renforce les synapses (c'est-à-dire augmente l'intensité de la réponse du neurone postsynaptique à un potentiel d'action), ce qui est essentiel pour la mémoire à long terme. En 1997, Henry Markram et Bert Sakmann, de l'Institut Max Planck de recherche médicale, à Heidelberg, ont découvert un mécanisme nommé plasticité dépendante du temps d'arrivée des signaux : quand des potentiels d'action parviennent à une synapse à une fréquence de la bande gamma et que le neurone postsynaptique émet systématiquement un potentiel d'action dans les dix millisecondes qui suivent, la synapse se renforce ; au contraire, quand le neurone postsynaptique s'active dix millisecondes avant l'arrivée du potentiel d'action, la connexion synaptique s'affaiblit.

Certaines preuves de l'importance de la chronologie des potentiels d'action pour

la mémoire proviennent de recherches sur l'hippocampe, une aire cérébrale impliquée dans la mémorisation des objets et des événements. L'émission de potentiels d'action par les neurones de l'hippocampe et des régions avec lesquelles il interagit est notablement influencée par des oscillations synchrones des ondes cérébrales, dans une bande de fréquences allant de quatre à huit hertz (bande θ). De telles oscillations se produisent par exemple lorsqu'un rat explore sa cage. Elles coordonneraient l'émission des potentiels d'action par les neurones et modifieraient durablement les synapses.

Les neurosciences sont à un tournant, car de nouvelles méthodes permettent d'enregistrer simultanément l'activité de milliers de neurones ; elles révèlent des schémas clés dans la chronologie des potentiels d'action et alimentent d'énormes bases de données. D'autres techniques sont apparues, telle l'optogénétique, qui consiste à activer sélectivement ou maintenir silencieuses des classes spécifiques de neurones en utilisant la lumière. Elles nous aideront à comprendre la façon dont sont encodées les communications internes du cerveau.

Alors pourrions-nous progresser dans la construction de machines peut-être aussi efficaces que le cerveau. ■

■ SUR LE WEB

Conférence de Terrence Sejnowski sur le fonctionnement des neurones : www.podcast.ethz.ch/podcast/episodes/?id=607

Vidéo sur une caméra imitant le fonctionnement de la rétine : ScientificAmerican.com/oct2012/dvs

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Fournier et al., *Adaptation of the simple or complex nature of V1 receptive fields to natural statistics*, *Nature Neuroscience*, vol. 14, pp. 1053-1060, 2011.

S. Liu et T. J. Sejnowski, *Neuromorphic systems*, *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 20(3), pp. 288-295, 2010.

K. Boahen, *Puces de silicium pour retrouver la vue*, *Pour la Science*, n° 332, 2005.

Du nouveau / au royaume de CRÉSUS

Un ver ruident

La Lydie, le pays où coule le Pactole, était un riche royaume à l'époque archaïque, qui reste mal connu.

Après plus d'un siècle de fouilles dans sa capitale, les archéologues viennent d'étendre leurs recherches à la province lydienne.

An 550 avant notre ère, le roi de Lydie reçoit d'alarmantes nouvelles concernant son beau-frère Astyage, le roi des Mèdes. Un coup d'État militaire vient de renverser le souverain de ce peuple d'origine iranienne établi dans les montagnes qui séparent Anatolie et Iran. Pire : c'est un vassal perse d'Astyage, du nom de Cyrus II qui est à l'origine du coup d'État. Un Perse ! Nul doute qu'il va vouloir agrandir encore son empire... Une guerre menace. Crésus décide de consulter les dieux quant au sort éventuel des armes lydiennes.

L'adversaire perse est dangereux, mais en ce VI^e siècle avant notre ère, la Lydie, qui domine l'Anatolie occidentale, l'est aussi. Malheureusement, nous ignorons presque tout de ce pays, hormis ce que la tradition grecque nous a livré et les quelques vestiges retrouvés à Sardes, sa capitale. Heureusement, les choses changent : après avoir fait le point sur le dossier historique et archéologique lydien, nous exposerons le résultat des recherches que nous avons récemment menées dans la province lydienne.

L'ESSENTIEL

La Lydie fut un royaume anatolien bien connu des Grecs archaïques entre le VIII^e et le VI^e siècle avant notre ère.

Hormis le récit de la chute de son dynastie, Crésus, les Anciens nous ont peu informés sur la Lydie.

Les fouilles menées depuis le XIX^e siècle ont confirmé le récit grec, livré des détails sur la vie quotidienne, mais peu de choses sur l'organisation typique d'une cité lydienne.

Identifiée récemment, une ville de province lydienne apporte de nouvelles informations.

© RMN-Grand Palais (musée du Louvre) / J. Levardowski

Fort de sa renommée, Crésus aurait sans doute mieux fait de faire le dos rond. Toutefois, il tient à venger son beau-frère, et peut aussi se sentir fort, puisqu'il a fait de la Lydie le plus grand royaume d'Asie Mineure et lui a associé les villes grecques de la côte. Avant lui, son père, dont il a hérité du trône vers -560, avait aussi soumis nombre de peuples anatoliens, conclu avec les Mèdes une paix durable, et convenu avec eux que le fleuve que les Turcs nomment aujourd'hui le Kizilirmak, c'est-à-dire

« la rivière rouge », mais que les Anciens nommaient l'Haly, servirait de frontière entre la Lydie et Mède.

Tester l'oracle

Crésus a donc envie d'agir, mais... sans s'arrêter trop. Pour cela, une méthode s'impose dans son esprit : consulter un oracle. Toutefois, il se méfie. Afin d'éprouver la qualité de la divination pratiquée dans les grands sanctuaires, il décide de la tester au préalable. Il envoie donc des messagers à qui il a donné l'ordre de ne se présenter



devant les oracles que 100 jours après leur départ de Sardes, puis de les éprouver en leur demandant à quelle activité, lui Crésus, est en train de se livrer ce jour-là. Seul son envoyé à Delphes revint avec une

réponse convaincante. La prêtresse du grand sanctuaire d'Apollon à Delphes avait déclaré qu'au centième jour Crésus s'était activé pour préparer, dans une marmite d'airain, un repas à partir d'un agneau et... d'une tortue. Impressionné par la puissance divinatoire de la Pythie, Crésus fait au sanctuaire les offrandes nécessaires, puis pose sa question : quelles seront les conséquences d'une guerre préventive contre les Perses ?

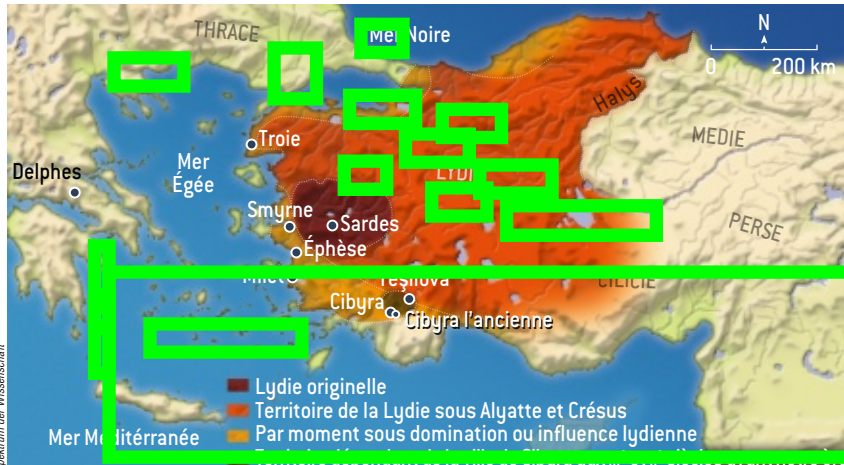
La réponse de l'oracle semble non seulement d'interprétation évidente, mais encourageante : « Si Crésus traverse l'Halys, il détruira un grand empire », déclare la Pythie.

Franchir l'Halys

Mis en confiance, le roi lydien mobilise, puis traverse l'Halys, et se porte au-devant de l'armée perse. Une première bataille a lieu près de la ville de Ptérie, qui n'est pas décisive. Cyrus n'attaquant pas dans les semaines qui suivent et l'hiver s'annonçant, Crésus décide de rentrer à Sardes... Or Cyrus le poursuit soudainement et les Perses dominent si bien dans les combats qu'ils obligent les Lydiens à se réfugier derrière les murs de Sardes. Après 14 jours de siège, seulement, la ville tombe !

Prisonnier de Cyrus, qui le traite avec égard, Crésus, indigné, envoie des messagers à Delphes pour protester contre la réponse énoncée de l'oracle. Hérodote (-484 à -420) nous a transmis la réponse du sanctuaire : « Crésus récrimine sans raison. Loxias (Apollon) qui prédisait que, s'il entrait en guerre contre les Perses il détruirait un grand empire. En face de cette réponse il aurait dû envoyer demander au chef de quel empire il parlait, le sien ou de celui de Cyrus. Il

1. CRÉSUS VEUT S'IMMOLER PAR LE FEU, mais Zeus éteint les flammes. Du moins est-ce ainsi que la légende décrit la dure destinée du roi de Lydie, désespéré par la perte de son royaume au cours d'une invasion perse.



2. LA PLUS GRANDE EXTENSION DU ROYAUME LYDIEN fut atteinte au VI^e siècle avant notre ère grâce aux conquêtes d'Alyatte et de son fils Crésus, qui pour sa part avait porté les frontières de la Lydie jusqu'à l'Halys, au-delà duquel commençait la Médie, l'une des régions perses.



3. UNE PRESQU'ÎLE SUR LE LAC GÜLLÜSKAN, en Turquie, aurait été le site de la première Cébira, la ville lydienne, qui a précédé Cybira, ville grecque membre de la Tétrapole, une confédération anatolienne de quatre cités grecques. Une époque de prospérité est suggérée par les rares traces de la façon dont les Lydiens d'une petite ville de province vivaient.

L'AUTEUR



Oliver HÜLTEN, archéologue, travaille à l'Institut d'archéologie classique de l'Université Louis-Maximilien à Munich, où il codirige le projet austro-allemand Kybiratis.

n'a pas compris ce qu'on lui avait dit, il n'a pas interrompu de nouveau: qu'il s'en fasse grief à lui-même.» C'est ainsi que la Lydie devint une satrapie, c'est-à-dire l'une des provinces de l'empire Perse.

Le destin tragique de Crésus ayant beaucoup inspiré les poètes de l'Antiquité, plusieurs versions de la suite de son histoire nous sont parvenues, dont une dans laquelle les dieux interviennent pour lui épargner la mort (voir la figure 1). Quoi qu'il en soit, nous avons de cette façon davantage d'informations sur rapportant à Crésus que nous n'en avons sur son peuple et sa culture...

Que savons-nous? Les informations dont nous disposons proviennent pour l'essentiel de fouilles dans la capitale lydienne, tandis que le reste du royaume – c'est-à-dire la quasi-totalité de la Turquie occidentale – n'a pas été étudié. En ce qui concerne Sardes, la capitale royale, elle fut probablement localisée dès 1444 par le marchand italien Cyriaque d'Ancône (1391-1455), qui, passionné par l'Antiquité,

consacra de nombreux voyages à rechercher les villes antiques. Le marchand et explorateur français Jean-Baptiste Tavernier (1605-1689) suivit ensuite un temps la trace de Crésus. C'est lui qui, en 1670, identifia les ruines de Sardes d'après leur position entre le fleuve Hermos (le Gediz) et son affluent le Pactole.

Les premières fouilles eurent lieu au début du XX^e siècle sous la direction de Howard Butler, de l'Université Princeton. Elles furent ensuite poursuivies par George Hanfmann, de l'Université de Harvard, et Nicholas Cahill, de l'Université du Wisconsin-Madison. Cependant, comme les strates du VI^e siècle avant notre ère sont en général recouvertes de couches archéologiques postérieures, ces archéologues et ceux qui les ont suivis n'ont pu jusqu'à présent fouiller la Sardes lydienne qu'en de rares endroits. Sur l'acropole, c'est-à-dire sur «la ville haute» (en grec), dont les remparts dominaient la ville, il semble que peu de restes des strates du VI^e siècle avant notre ère aient résisté à la destruction par les Perses, puis aux travaux des époques subséquentes. On peut supposer que le palais royal lydien, les temples et d'autres bâtiments réservés à l'élite lydienne s'y trouvaient. C'est du moins ce que suggère la présence d'objets de grande qualité dans le mobilier archéologique, tels des vases de bronze ornés de représentations animales, une riche vaisselle d'importation, en or, des monnaies d'argent ou d'électrum, un alliage naturel.

Acropole lydienne

Des plaques en terre cuite ornées de reliefs et peintes de bleu et de blanc attestent aussi de la richesse passée. Sans doute ornaient-elles les frises des murs d'adobe (brique de terre crue) posés sur des fondations de pierres taillées. Pour sa part, le toit était recouvert de tuiles peintes et orné de décorations en terre cuite. À en croire les fouilleurs, les types de bâtiments et leur décoration suggèrent qu'il s'agit d'un temple de Cybèle, la grande déesse féminine originaire de Phrygie, pays situé entre la Lydie et la Cappadoce. Une interprétation vraisemblable puisque Hérodote rapporte l'existence à Sardes de ce temple. Autre indice: la relation spéciale que Crésus avait manifestement avec Cybèle, puisqu'il a contribué à l'érection

de l'artémision d'Éphèse, un grand temple grec en marbre dédié à Artémis qui, en Asie Mineure, semble avoir été identifiée à Cybèle (voir la figure 5).

Au pied de l'acropole s'étirait la ville basse, qui fut aussi brûlée et pillée par les Perses, de sorte que les incendies, puis l'effondrement des maisons, ont scellé pour nous un nombre de témoignages de la vie quotidienne : marmites de terre, vaisselle décorée, contenants à parfums ou à onguents, vases rituels... une grande partie de ce mobilier archéologique étant dans un état de conservation excellent que l'on ne rencontre d'ordinaire que dans les tombes. Le style de ces poteries montre que la plupart sont d'origine locale, les autres ayant été importées des villes grecques de la côte occidentale.

Les archéologues ont en outre retrouvé toutes sortes d'objets domestiques, tels des pesos, des piques pour griller la viande et des bijoux variés. Une partie de ces objets semble avoir été produite dans les habitations pour être vendue. Un atelier de production d'objets d'or a même été mis au jour ; ce métal précieux y était probablement fondu, puis travaillé. Issu de l'électrum mêlé aux sables de la rivière Pactole, cet or était à l'origine de la richesse des Lydiens.

La ville basse comportait probablement aussi un palais et un temple, du moins d'après les éléments d'architecture lydiens réemployés dans des constructions ultérieures. C'est ainsi que les archéologues ont

découvert des sculptures et des bas-reliefs, qui, au moins dans un cas, représentent la déesse Cybèle, ainsi que des représentations animales, probablement les attributs animaux d'une divinité. Il s'agit de lions, si fréquents qu'ils sont pratiquement devenus l'emblème des Lydiens !

Mort d'une pierre à la main

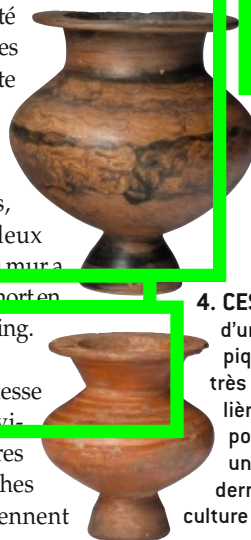
Depuis 1988, des archéologues américains organisent chaque année des fouilles à Sardes. Ils ont en particulier étudié le rempart de briques d'adobe (sur fondation de pierre), qui défendait la ville. Par endroits haut de 10 mètres, il était épais de 18 à 20 mètres... La partie de cette muraille dégagée des dernières années comprend l'une des portes de la ville et des maisons attenantes. C'est ainsi qu'on a découvert des traces de la chute de la ville : d'épaisses couches de cendres et de débris contenant quelques épées, casques et pointes de flèches, ainsi que des squelettes de deux soldats. L'effondrement du mur a enseveli... L'un d'entre eux est mort en serrant une pierre dans son poing. Un protocole ?

Quant à la mythique richesse de Sardes, elle est surtout évidente dans les tertres funéraires que se faisaient ériger les riches Lydiens. Ces tumulus contiennent

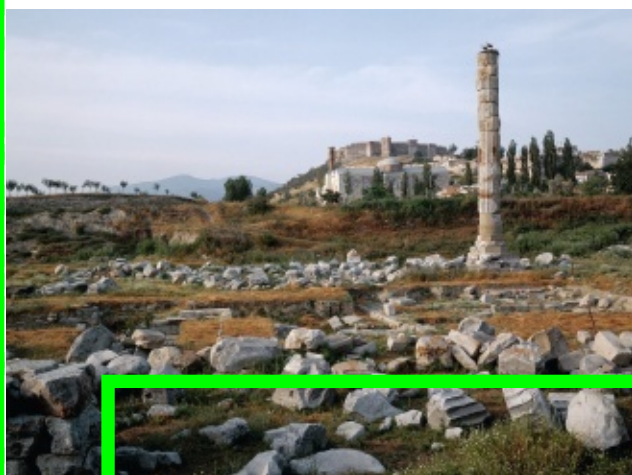
une chambre funéraire à toit pentu pour recevoir le mort et les offrandes funéraires et un long couloir d'accès à la chambre ; le tout recouvert d'un amas de terre couronné par une pierre sculptée en forme de phallus (voir la figure 8). Malheureusement les pillards, à la recherche des légendaires richesses lydiennes, les ont profanées et pillées au cours des siècles...

Ces découvertes, pour précieuses qu'elles soient, ne nous renseignent cependant ni sur la structure typique d'une ville lydienne ni sur la façon d'y vivre. Mais cette situation s'améliore depuis qu'en 1995, un heureux hasard a conduit l'épigraphiste Thomas Corsten, de l'Université de Vienne, à découvrir une cité lydienne provinciale dans la Cibyatis. Ce nom désigne le territoire de la Téraopole des Milyens, formée par les cités grecques (ou du moins hellénisées) de Cibyra (voir la figure 2), d'Enoanda, de Balbura

et de Bubon. Aujourd'hui, la Cibyra grecque consiste en d'impressionnantes ruines



4. CES LYDIENS, vases ventrus dotés d'un pied et de bords plats, sont typiques de la Lydie, où ils étaient très répandus. Leur forme si particulière a été largement copiée par les potiers grecs. Leur présence sur un site de fouille indique que ce dernier relève probablement de la culture matérielle des Lydiens.



5. UN ARTÉMISION, UN GRAND TEMPLE GREC DÉDIÉ À ARTÉMIS, la déesse de la chasse et de la Lune (ci-dessus les ruines, et à droite la restitution), a été élevée à Sardes vers -500, après qu'Alexandre eut chassé les occupants perses. Pour se concilier les populations autochtones, les colons grecs fondateurs d'Éphèse et de la région de Sardes auraient fusionné leur déesse Artémis avec la Cybèle lo-



cale, de sorte qu'un rapport existe entre l'Artémis vénérée à Éphèse et la déesse d'origine phrygienne Cybèle. En son temps, Crésus aurait contribué à l'édification à Sardes d'un grand sanctuaire dédié à l'Artémis-Cybèle. Des indices de cette contribution ont été retrouvés non loin de l'artémision, sur l'acropole (non visible) où les chercheurs fouillent les vestiges de la capitale lydienne.

proches de la petite ville turque actuelle, de Gölhisar. Comme Strabon (-63 à 23) rapporte que la cité grecque n'a pas été fondée ex nihilo, mais transférée, T. Corsten m'a proposé de rechercher avec lui cette «Cibyra l'ancienne».

L'exploration des sites possibles nous a conduits à seulement trois kilomètres de la Cibyra grecque sur la presqu'île rocheuse qui singularise le lac Gölhisar voisin. Là, des restes d'une agglomération préhellénistique et de son imposante nécropole ont été repérés, et tout indique qu'elle est lydienne. C'est remarquable puisque la plus grande partie de la Cibyra antique se trouve sur le territoire des Lyciens, un peuple anatolien impla-



6. CES RESTES D'UNE SCULPTURE de faucon ont été retrouvés dans un champ de pommiers à l'abandon sur une presqu'île du lac turc de Gölhisar. Les archéologues estiment que la sculpture d'origine mesurait deux mètres de haut, ce qui montre le caractère monumental que les Lydiens ont voulu donner à ce faucon, l'un des animaux-symboles de la déesse proche-orientale Cybèle.

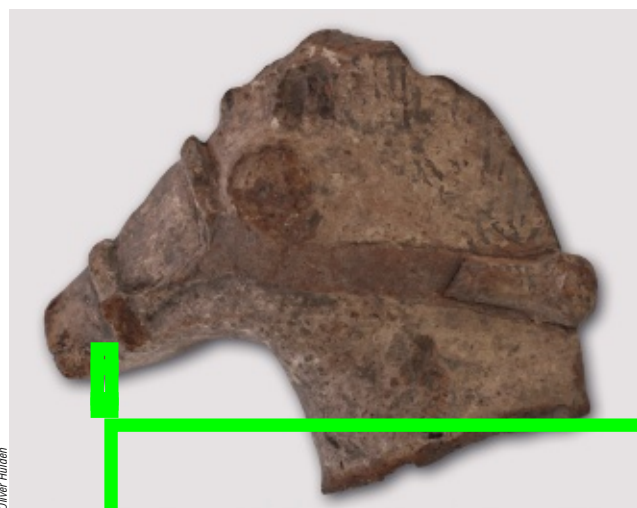
nant des sondages systématiques sur la presqu'île et dans les environs du lac afin de noter et de situer sur une carte toutes les découvertes de surface.

Très peu d'indices visibles signalent aujourd'hui la présence d'une agglomération antique : quelques murs écroulés, des restes dispersés de constructions, ainsi que des cavités aménagées dans les champs. L'œil exercé, cependant, identifie aussi des zones ayant été terrassées avant la construction de maisons et y reconnaît la présence sous-jacente de fondations. Dans un champ de pommiers à l'abandon, nous avons par ailleurs retrouvé des milliers de tessons de céramiques peintes. La plupart d'entre eux datent manifestement de l'époque archaïque (du VIII^e au V^e siècle avant notre ère) et peuvent être attribués aux VII^e et VI^e siècles avant notre ère. La comparaison avec les tessons de même époque retrouvés dans la région nous a par ailleurs appris que beaucoup de ces poteries ont été fabriquées sur place. Celles qui ont été importées, le furent de Carie - une petite région située entre la Lydie et la côte Ouest -, qui était alors sous domination lydienne, mais aussi des villes grecques d'Anatolie. Une petite tête de cheval en terre cuite, d'origine crétoise, a été retrouvée ; elle est sans doute parvenue sur place en passant par la Tétrapole (voir la figure 7).

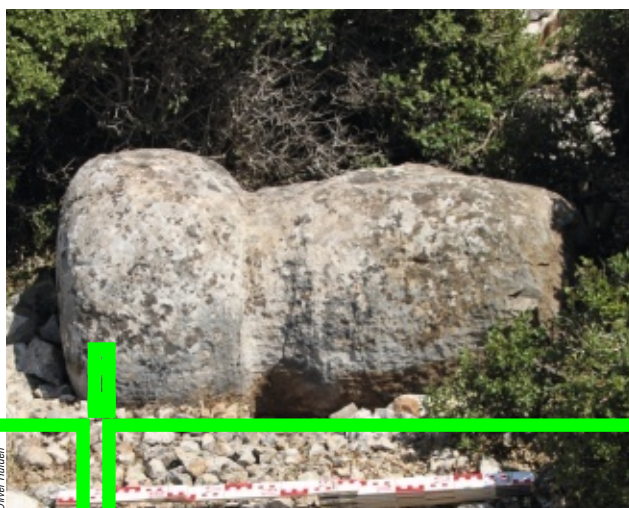
Or des tessons de vases typiquement lydiens suggèrent aussi que nous avons bien affaire à la pré-Cibyra lydienne. Par

Cibyra l'ancienne

Nous avons porté notre attention sur ce site parce que, dans les années 1980, des archéologues du musée archéologique de la capitale provinciale de Burdur, ayant eu vent d'un pillage de tombes antiques, y ont mené des fouilles de sauvetage. Le mobilier funéraire qu'ils ont pu sauver comprenait nombre de vases dont la variété, la qualité et l'assemblage ont déclenché des spéculations chez les archéologues. Informé, Alan Hall, de l'Institut britannique d'Ankara, examina alors le site de près et crut y reconnaître Sinda, une agglomération évoquée par Strabon. Avec T. Corsten, nous avons repris les choses là où A. Hall les avait laissées, en entrepre-



7. CETTE PETITE TÊTE DE CHEVAL EN TERRE CUITE a sans doute fait partie d'une offrande dédiée à Cybèle. Fait intéressant, elle a été façonnée en Crète, d'où elle a été probablement importée dans la Tétrapole d'abord, avant d'être consacrée dans le temple de la Cibyra ancienne.



8. CE GENRE DE PIERRE DE FORME TUMULUS couronnait les tertres funéraires des riches Lydiens. Les restes de ces tumulus ont été retrouvés dans les environs de la Cibyra ancienne, mais ils ont malheureusement tous été pillés.

ailleurs, des fragments d'assiettes de terre cuite ressemblent aux assiettes découvertes à Sardes. Mais ce n'est pas tout : sur la pente surmontant le champ de pommiers, une de nos étudiantes a découvert dans un buisson un fragment de sculpture en calcaire (voir la figure 6) comportant des plumes stylisées. Il semble qu'elles faisaient partie d'une statue d'oiseau de grande taille. Son style la fait remonter au VI^e siècle avant notre ère, et on peut l'attribuer à l'aire culturelle gréco-lydienne. Or, à Sardes, ont été retrouvées des œuvres de style comparable, de sorte qu'il s'agit sans doute d'une représentation de faucon, le second des animaux-attributs de Cybèle (le premier étant le lion). Une telle sculpture ne peut provenir que d'un sanctuaire, ce qui explique les coûteuses assiettes de terre cuite, ainsi que la tête de cheval : toutes sont des offrandes sacrificielles.

Depuis ces découvertes, nous avons pu établir que la cité consistait en quelques dizaines de maisons d'adobe construites sur des terrasses aménagées et reliées par des ruelles. Il est probable que, quelque 40 mètres au-dessus du lac, une plate-forme taillée dans le roc accueillait une acropole comportant des bâtiments de prestige, et surmontant le sanctuaire. L'organisation de cette petite cité devait être comparable à celle de Sardes, et sans doute y vivait-on sur place comme dans la capitale, quoiqu'à une échelle provinciale.

Le caractère lydien de cette ville est confirmé par la nécropole de la ville, située au Sud du lac : plus de 50 tertres funéraires en pierre ont été répertoriés, même s'ils ne sont presque plus reconnaissables tant ils ont été bouleversés par les pillards, puis leurs pierres réemployées par les villageois turcs voisins. C'est pourquoi nous n'y avons découvert que des restes d'offrandes funéraires, consistant en fragments de céramiques archaïques, morceaux de vase de bronze ou armatures métalliques de chariot. Ses tumulus étaient encore dotés de leur pierre sommitale (voir la figure 8). Si l'on imagine à quel point ces tertres devaient dominer le paysage dans l'Antiquité, il semble bien que l'agglomération que nous avons étudiée devait être de quelque importance. Les nombreux objets importés que l'on y a retrouvés attestent par ailleurs de contacts avec l'extérieur.

Quelle place jouait exactement « Cibyra l'ancienne » dans l'ensemble lydien ? Peut-être s'agissait-il d'une petite cité, que les



9. CETTE TOMBE LYDIENNE CREUSÉE DANS UNE FALAISE est ornée d'un bas-relief représentant un lion bondissant et trois chèvres sauvages ; elle se trouve à quelque 90 kilomètres de l'ancienne cité lydienne de Cibyra.

Lydiens fondèrent sur la frontière afin de stabiliser un territoire nouvellement conquis ?

Les constatations faites à « Cibyra l'ancienne » posent par ailleurs un problème archéologique. La plupart des céramiques retrouvées datent de l'époque archaïque, pourquoi n'en retrouve-t-on pas datant des trois siècles qui séparent l'époque archaïque du déplacement de la cité à l'origine de la Cibyra grecque, d'après Hérodote ? La cité lydienne a-t-elle été abandonnée parce que, comme Sardes, elle était tombée dans les griffes perses ? C'est possible, puisque nous savons qu'après la chute de Sardes, le général Harpage, principal lieutenant de Cyrus, s'est occupé de soumettre la province lydienne.

Quoi qu'il en soit, il y a enfin du nouveau en archéologie lydienne ! Une demi-douzaine de projets internationaux ont été lancés pour répondre aux questions ouvertes, et les découvertes se multiplient. Notre équipe vient par exemple de mettre au jour près de Yes, à quelque 90 kilomètres du lac de Gölhisar, une fortification en pierre taillée sur un plateau, qui date approximativement de la même époque. À quelques kilomètres de là, une tombe creusée dans une falaise (voir la figure 9) est ornée par un bas-relief montrant un lion bondissant et trois chèvres sauvages. Le style de cette œuvre fait penser au VI^e siècle avant notre ère, et le même motif se trouve

sur un autel en marbre dédié à Cybèle à Sardes. L'archéologie lydienne est une affaire à suivre. ■

BIBLIOGRAPHIE

- N. D. Cahill, *The Lydians and their World*, Yapı Kredi Kültür Sanat Yayıncılık, Istanbul, 2010.
- C. H. Roosevelt, *The Archaeology of Lydia*, Cambridge University Press, 2009.

DES HIVERS plus rigoureux ?

Charles Greene

Le recul de la banquise en Arctique perturbe la dynamique atmosphérique et serait responsable d'hivers rigoureux aux États-Unis et en Europe.

Ces dernières années, différentes régions de l'Amérique du Nord et de l'Europe ont connu des hivers exceptionnels. Tout d'abord, pendant les hivers de 2009 à 2011, l'Ouest et le Nord de l'Europe ainsi que la côte Est des États-Unis ont subi une série de tempêtes froides et neigeuses dont celle que les Américains ont nommée *snowmageddon* – contraction de *snow*, la neige, et *armageddon*, l'apocalypse. Cette tempête s'est abattue en février 2010 sur la ville de Washington, et a empêché le gouvernement fédéral de fonctionner pendant près d'une semaine.

En octobre de cette même année, le Centre des prévisions climatiques de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, l'agence américaine responsable de l'étude de l'océan et de l'atmosphère) avait prévu pour l'Est des États-Unis un hiver 2010-2011 doux en raison du phénomène *La Niña* (des eaux de surface plus froides dans le Pacifique tropical Est, qui favorisent la remontée d'air chaud du Mexique vers les États-Unis). Mais, malgré les effets modérateurs de *La Niña*, des

L'ESSENTIEL

Avec le réchauffement global, la fonte estivale de la banquise arctique s'accroît. Cela modifie les conditions atmosphériques qui influencent le climat hivernal en Europe et en Amérique.

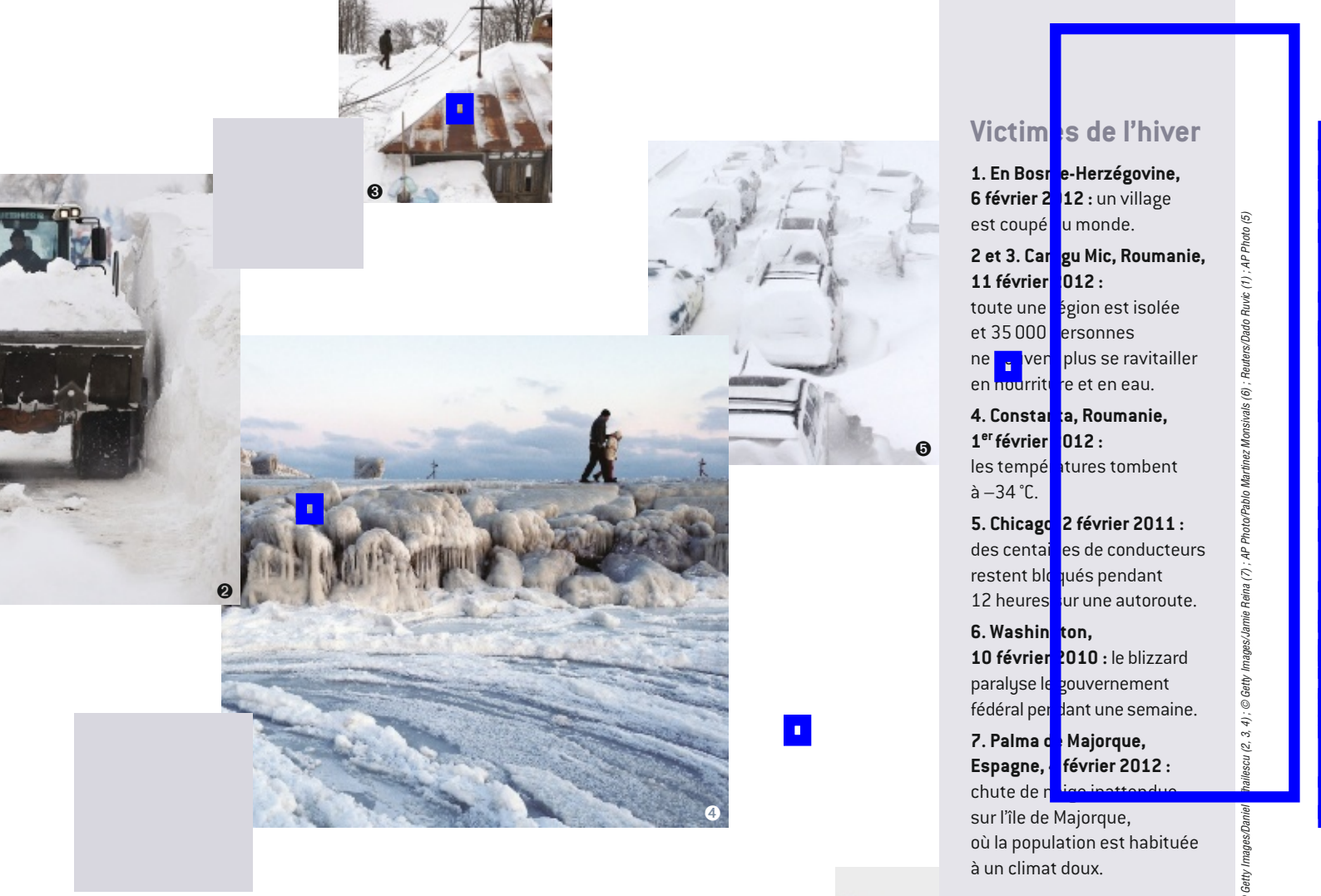
Ces changements entraînent des incursions d'air arctique aux latitudes moyennes, ce qui augmente la probabilité de hivers rigoureux.

Il est difficile de prévoir la rigueur d'un hiver même si les conditions suggèrent de possibles vagues de froid intense.

températures très basses et des chutes de neige incessantes ont frappé les villes de New York et de Philadelphie en janvier 2011, contredisant tous les prévisionnistes.

L'hiver 2011-2012 a aussi apporté son lot de surprises. L'Est des États-Unis a connu l'un des hivers les plus doux de son histoire, tandis que d'autres parties de l'Amérique du Nord et de l'Europe avaient moins de chance. En Alaska, la température moyenne de janvier a été, dans l'ensemble de l'État, inférieure de 10 °C aux valeurs typiques pour cette saison. Lors d'une tempête, des villes du Sud-Est de l'Alaska se sont retrouvées sous deux mètres de neige. En même temps, une importante vague de froid a submergé l'Europe centrale et de l'Est, avec des températures de -30 °C et des congères allant jusqu'aux toits. Quand le dégel a finalement arrivé mi-février, plus de 550 personnes avaient perdu la vie.

Comment expliquer de tels épisodes de froid au cours d'une décennie 2002-2012 qui fut par ailleurs la plus chaude de ces 160 dernières années, depuis le début du suivi des températures globales ? Certains



Victimes de l'hiver

- 1. En Bosnie-Herzégovine, 6 février 2012 :** un village est coupé du monde.
- 2 et 3. Caragu Mic, Roumanie, 11 février 2012 :** toute une région est isolée et 35 000 personnes ne peuvent plus se ravitailler en nourriture et en eau.
- 4. Constanta, Roumanie, 1^{er} février 2012 :** les températures tombent à -34°C .
- 5. Chicago, 2 février 2011 :** des centaines de conducteurs restent bloqués pendant 12 heures sur une autoroute.
- 6. Washington, 10 février 2010 :** le blizzard paralyse le gouvernement fédéral pendant une semaine.
- 7. Palma de Majorque, Espagne, 1^{er} février 2012 :** chute de neige inattendue sur l'île de Majorque, où la population est habituée à un climat doux.

© Getty Images/Daniel Hallescu (2, 3, 4) ; © Getty Images/Jamie Reina (7) ; AP Photo/Pablo Martinez Monsivals (6) ; Reuters/Dado Ruvic (1) ; AP Photo (5)

scientifiques semblent avoir trouvé une réponse surprenante avec un phénomène qui se déroule plusieurs mois avant l'hiver et dans une région différente de celle où sévissent les hivers rigoureux en question : les fontes record subies par la banquise de l'océan Arctique au cours de l'été précédent.

Le facteur déclenchant : une fonte record de la banquise

L'Arctique a beaucoup changé depuis mon premier voyage au-delà du cercle polaire en avril 1989. Le changement le plus visible est le recul de plus en plus marqué de la banquise au cours de l'été. Alors qu'au cours de l'hiver, l'océan Arctique gèle presque complètement, la banquise fond, l'été, son étendue devenant minimale en septembre.

Il résulte de cette dynamique que la banquise est composée d'une épaisse couche de glace qui s'est accumulée au fil des ans, et d'une couche beaucoup plus mince de

glace qui se forme chaque année, à des endroits libérés des glaces en été.

En 1989, l'étendue de la banquise en hiver était légèrement supérieure à 16 millions de kilomètres carrés. La moitié environ était de la glace ancienne – ou pérenne – qui perdurait pendant l'été. La situation est différente aujourd'hui. Bien que l'étendue de la banquise hivernale en 2012 approche celle de 1989, la quantité de glace en septembre 2012 était deux fois moins importante que celle de septembre 1989 (voir l'encadré page 64).

La fonte estivale de la banquise arctique n'a pas été régulière. Depuis les premières mesures satellitaires de la glace, en 1979, et jusqu'au milieu des années 1990, la diminution de la banquise restait limitée. De 2000 à 2007, le déclin s'est accéléré, mais il a fallu attendre le net changement de 2007 pour que le monde en prenne conscience. Au cours de cette seule année, l'étendue minimale de la banquise estivale a chuté de

26 pour cent, passant de quelque 5,8 millions de kilomètres carrés en septembre 2006 à environ 4,3 millions en septembre 2007.

L'AUTEUR



Charles GREENE est professeur de sciences de la Terre et de l'atmosphère. Il dirige

le Programme des ressources et écosystèmes océaniques de l'Université Cornell, aux États-Unis.

Cette fonte sans précédent de la glace pérenne a obligé les scientifiques à revoir leurs projections du moment où l'océan Arctique connaîtrait son premier été sans glace. D'après les données collectées avant 2007, le quatrième rapport d'évaluation du GIEC (Groupe international d'experts sur l'évolution du climat) avait estimé que le premier été sans glace se produirait vers la fin du XXI^e siècle. Certains modèles projettent maintenant que cet événement pourrait avoir lieu des décennies plus tôt, entre 2020 et 2040.

La fonte estivale de la banquise est l'un des aspects de l'amplification du réchauffement global qui touche l'Arctique depuis quelques décennies. Alors que le reste du monde a subi une hausse des températures moyennes de l'ordre de 0,8 °C depuis le début du XX^e siècle, les températures moyennes de l'Arctique ont augmenté de plus du double au cours des 50 dernières années. En raison de ce réchauffement rapide, les régimes climatiques arctiques ont été modifiés et de vastes

étendues de pergélisol (où le sous-sol est gelé) ont commencé à fondre. Les modifications de l'environnement ont perturbé des habitats cruciaux pour la faune de la région et menacent la survie à long terme de nombreuses espèces. De même, les populations des régions polaires, bien connues pour leurs adaptations culturelles au froid, voient leur mode de vie bouleversé.

Bien que ces changements puissent sembler lointains à la plupart de ceux qui vivent bien au sud des régions polaires, le reste de l'hémisphère Nord est concerné par les effets de l'amplification arctique et de la fonte de la banquise. Les régimes climatiques des latitudes moyennes sont influencés par le climat arctique, ce qui soulève une question clef : le réchauffement global est-il impliqué dans les épisodes récents de froid hivernal intense ou bien ces épisodes s'inscrivent-ils dans le schéma général des oscillations climatiques naturelles de la planète ?

La nature s'est clairement manifestée pendant mon enfance dans la région de Washington, dans les années 1960, quand, avec mes camarades, nous avançons péniblement dans la neige pour aller à l'école en cette décennie aux hivers plus rudes que d'habitude. Les climatologues ont observé que ces hivers froids et neigeux pouvaient être associés à deux variations naturelles du climat qu'on nomme aujourd'hui l'oscillation arctique, OA, et l'oscillation nord-atlantique, NAO (pour North Atlantic Oscillation) (voir l'encadré page 65). De nombreux facteurs agissent sur ces deux oscillations, telles les interactions atmosphère-océan. Les effets les plus remarquables des oscillations se produisent en hiver.

L'intensité de chaque oscillation est caractérisée par un indice qui quantifie les anomalies (par rapport aux pressions moyennes dans la distribution hivernale de la pression atmosphérique au-dessus d'une région spécifique. Dans le cas de l'oscillation arctique, la région concernée est très vaste ; elle comprend l'essentiel de l'hémisphère Nord, du pôle Nord jusqu'à la limite des tropiques, 20 degrés de latitude Nord (à peu près la latitude de Cuba). L'indice OA peut être positif ou négatif. Les valeurs positives correspondent à des pressions inférieures à la moyenne dans l'Arctique et supérieures à la moyenne dans la région subtropicale. Durant les phases positives de l'indice OA, des pressions très basses dans

La nature s'est clairement manifestée pendant mon enfance dans la région de Washington, dans les années 1960, quand, avec mes camarades, nous avançons péniblement dans la neige pour aller à l'école en cette décennie aux hivers plus rudes que d'habitude. Les climatologues ont observé que ces hivers froids et neigeux pouvaient être associés à deux variations naturelles du climat qu'on nomme aujourd'hui l'oscillation arctique, OA, et l'oscillation nord-atlantique, NAO (pour North Atlantic Oscillation) (voir l'encadré page 65). De nombreux facteurs agissent sur ces deux oscillations, telles les interactions atmosphère-océan. Les effets les plus remarquables des oscillations se produisent en hiver.

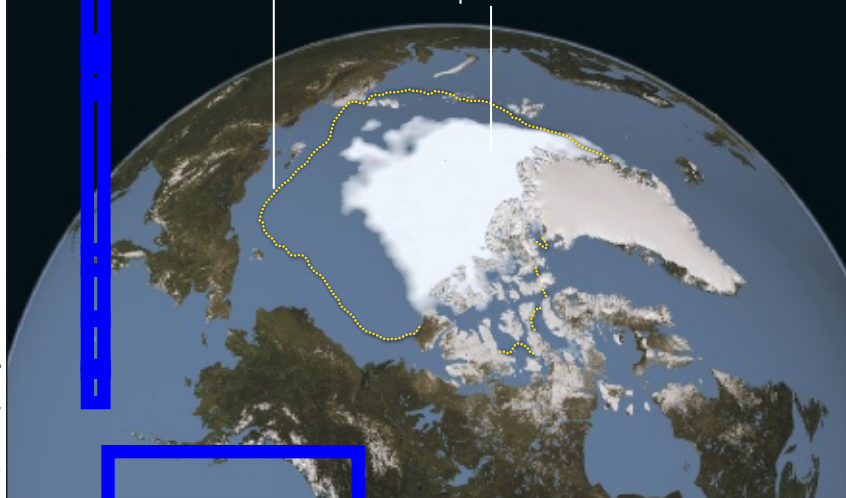
UNE BANQUISE QUI RECULE DE PLUS EN PLUS

Durant l'hiver, la glace recouvre l'ensemble de l'océan Arctique. Une partie de cette glace disparaît en été, découvrant la mer. Le réchauffement global du climat a augmenté le recul de la banquise estivale, ce qui a modifié les échanges de chaleur entre l'océan et l'atmosphère, d'où une influence sur le temps hivernal aux États-Unis et en Europe. En 1979, quand les mesures par satellite ont débuté, l'étendue de la banquise arctique couvrait sept millions de kilomètres carrés.

Depuis 2007, le recul est devenu spectaculaire, et un nouveau record d'étendue minimale a été atteint le 16 septembre 2012, avec seulement 3,44 millions de kilomètres carrés.

Moyenne du minimum de couverture en glace (1979-2010)

16 septembre 2012



l'Arctique conduisent à un renforcement du vortex polaire – une circulation permanente des vents d'altitude s'écoulant d'Ouest en Est autour de l'Arctique. Un vortex polaire renforcé tend à retenir les masses d'air arctique froid au Nord du cercle polaire.

À l'inverse, durant les phases d'indice OA négatif, les pressions anormalement élevées dans l'Arctique affaiblissent le vortex polaire. Des masses d'air arctique s'engouffrent au Sud vers les latitudes moyennes, où elles dispensent des épisodes froids et neigeux. La côte Est des États-Unis et le Nord de l'Europe sont en première ligne face à de tels phénomènes lorsque l'indice OA est négatif.

Quant à l'indice NAO, il caractérise les anomalies de la distribution de la pression atmosphérique, en période hivernale, sur

une région beaucoup plus petite, comprenant le secteur atlantique de l'hémisphère Nord allant du centre des hautes pressions subtropicales, près des Açores, au centre des basses pressions subarctiques, près de l'Islande. Comme l'indice OA, l'indice NAO peut être positif ou négatif. Les valeurs positives correspondent à des pressions atmosphériques supérieures à la moyenne au niveau de l'anticyclone des Açores et inférieures à la moyenne près du centre des basses pressions subarctiques.

Quand l'indice NAO est positif, les différences de pression accentuées renforcent les vents d'Ouest sur l'Europe, qui soufflent toute l'année d'Ouest en Est au niveau des latitudes moyennes de l'hémisphère Nord. Les différences de pression s'accroissent aussi le long du

jet ou *jet stream* (un flux d'air rapide qui fait le tour de la Terre) sur une trajectoire Nord-Est depuis la côte Est de l'Amérique du Nord jusqu'à l'Europe septentrionale. Les tempêtes hivernales qui traversent l'Atlantique du Nord suivent une trajectoire similaire, apportant un temps plus doux et humide sur l'Europe du Nord.

Le courant-jet déboussolé

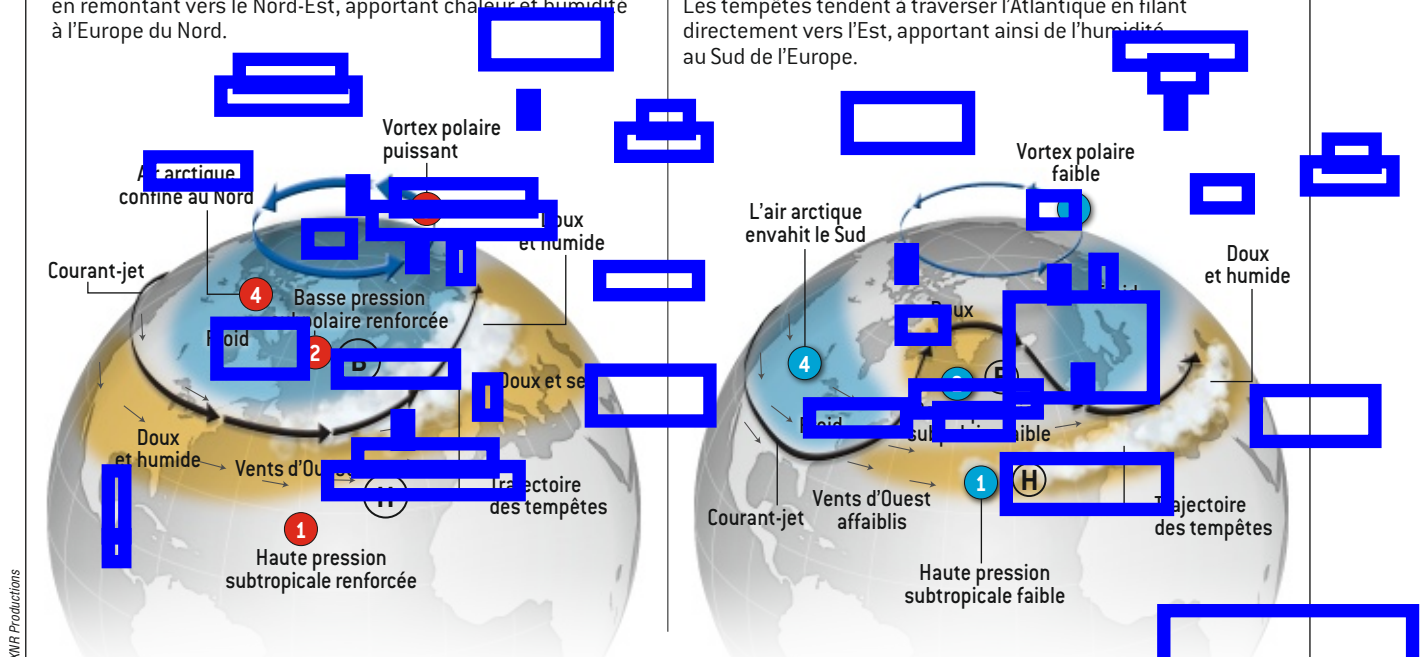
En revanche, avec un NAO négatif, les différences de pression sont moins marquées et affaiblissent les vents d'Ouest, et le courant-jet qui part de l'Amérique du Nord vire plus au Nord, atteignant le Groenland avant de dévier vers le Sud en direction de l'Europe. Mais dans ce cas, la trajectoire des

LIER LE CLIMAT ET LA MÉTÉO

Deux oscillations climatiques naturelles, l'oscillation arctique (OA) et l'oscillation nord-atlantique (NAO), peuvent influencer le temps hivernal des États-Unis et de l'Europe. Les indices OA et NAO qui caractérisent leur état peuvent être positifs ou négatifs, et le rayon généralement s'explique. Le lien important des indices OA et NAO est qu'ils entraînent des modifications climatiques qui favorisent des conditions OA et NAO négatives, conduisant à des hivers plus rigoureux.

Les états d'indices NAO et OA positifs sont caractérisés par un centre de haute pression atmosphérique (H) dans la zone subtropicale (1) et un centre de basse pression (B) dans la zone subarctique (2). Un indice OA positif est associé à un fort vortex polaire (3) ; ce dernier confine l'air arctique froid au Nord (4) et permet à l'air chaud des latitudes plus basses de remonter très au Nord à l'intérieur des États-Unis et en Europe. Dans ces conditions, le courant-jet et la trajectoire générale des tempêtes traversent l'Atlantique en remontant vers le Nord-Est, apportant chaleur et humidité à l'Europe du Nord.

Les états d'indices NAO et OA négatifs correspondent à des pressions atmosphériques plus modérées dans la zone subtropicale (1) et la zone subarctique (2). Un indice OA négatif est associé à un vortex polaire affaibli (3), ce qui permet aux masses d'air froid d'envahir les États-Unis et le Nord de l'Europe (4). Dans ces conditions, le courant-jet emprunte une trajectoire plus sinusoïdale : il passe au Sud de la côte Est des États-Unis et remonte haut au-dessus de l'Atlantique près du Groenland, avant de repionger vers l'Europe du Sud. Les tempêtes tendent à traverser l'Atlantique en filant directement vers l'Est, apportant ainsi de l'humidité au Sud de l'Europe.



tempêtes converge du courant-jet, traversant l'Atlantique du Nord directement vers le Sud de l'Europe et la Méditerranée, où cela apporte un temps plus humide et doux. L'Europe du Nord, au contraire, connaît alors une période de froid sec.

Quant à savoir s'il faut traiter l'OA et le NAO comme deux modes distincts de la variabilité naturelle du climat, les avis des climatologues sont partagés. Certains affirment que le NAO n'est qu'une manifestation nord-atlantique de l'OA ; pour d'autres, les dynamiques sont assez différentes pour justifier un traitement séparé. Si les deux indices sont souvent très corrélés, leurs comportements divergent parfois de façon importante, comme cela fut le cas durant l'hiver 2011-2012.

Il est difficile de distinguer les changements météorologiques liés aux oscillations naturelles du climat de ceux dus aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Comme ces deux phénomènes se superposent, il est nécessaire d'utiliser des méthodes statistiques pour les sépa-

rer. Des études récentes ont apporté de nouveaux éléments qui renforcent l'idée selon laquelle le réchauffement global et la fonte de la banquise arctique modifient nos hivers actuels en perturbant les rythmes normaux de l'OA et du NAO.

Des conditions réunies pour un temps hivernal

En revenant sur les années 1960, nous constatons que les indices OA et NAO étaient tout négatifs, conduisant à des hivers plus neigeux et plus froids que la moyenne le long de la côte Est des États-Unis et en Europe du Nord. Il n'y a pas de raison de soupçonner que cette décennie d'hivers rudes ait été liée à autre chose qu'à la variabilité naturelle des indices OA et NAO. Cependant, des années 1970 aux années 1990, l'indice NAO a été le plus souvent positif, à une exception près.

Il en a résulté des hivers doux, qui ont coïncidé avec la prise de conscience par la société du problème du réchauffement

global. Cela a conduit de nombreux scientifiques à faire l'hypothèse que l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre expliquerait ce qui semblait être une longue série d'hivers à indice NAO positif. Les modèles auxquels le GIEC se réfère prédisaient que cette tendance allait se poursuivre avec l'augmentation continue des gaz à effet de serre. Et pourtant, la prédominance des hivers à indices OA et NAO fortement positifs s'est inversée peu avant l'an 2000.

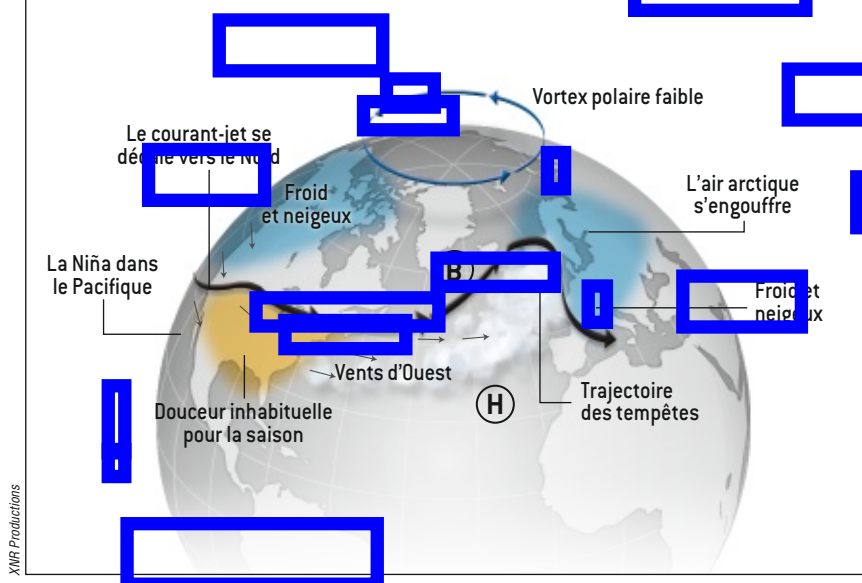
Le fait que cette série d'hivers à indice NAO positif ait pris fin ne signifie pas qu'on se soit rompu en supposant qu'il y avait un rapport entre la hausse des concentrations de gaz à effet de serre et l'oscillation nord-atlantique. Mais ce qui n'avait pas été anticipé à l'époque, c'est l'accélération de l'amplification arctique depuis la fin des années 1990. À partir du moment où les effets du réchauffement global se sont fait sentir au-dessus du cercle polaire, les conditions climatiques ont entamé une phase que Jim Overland et ses collègues de la NOAA ont qualifiée de « période arctique chaude ». Cette période a été caractérisée par un recul rapide de la banquise arctique, du pergélisol et des glaciers continentaux, mais aussi par la fonte en surface de l'inland-sis du Groenland – la calotte de glace qui recouvre 80 pour cent de cette île.

Dans chacun de ces changements, le processus dit de rétroaction glace-albédo joue un rôle crucial. Il s'agit de la diminution de l'albédo (la réflexion vers l'espace du rayonnement solaire incident sur une région), diminution due à la fonte de la couverture de glace, des surfaces terrestres et maritimes plus sombres se retrouvant exposées. La rétroaction glace-albédo inquiète beaucoup des scientifiques, car le recul de la banquise estivale expose davantage d'eau de mer. Celle-ci absorbe le rayonnement solaire, ce qui conduit à une hausse de la température des eaux de surface et a deux principaux effets de rétroaction. Premièrement, une partie de la chaleur en excès renforce encore davantage la fonte estivale de la banquise. Deuxièmement, l'océan libère lentement le reste de cet excédent de chaleur dans l'atmosphère au cours de l'automne. La pression atmosphérique et l'humidité augmentent dans l'Arctique et réduiraient les différences de température entre les latitudes arctiques et moyennes.

Une hausse de la pression atmosphérique arctique et une diminution du gradient de

CE QUI S'EST PASSÉ DURANT L'HIVER 2011-2012

Des conditions atmosphériques inhabituelles ont conduit à une étrange combinaison de conditions météorologiques extrêmes aux États-Unis et en Europe en 2012. Les oscillations OA et NAO sont souvent synchronisées, avec des indices soit positifs, soit négatifs pour les deux. Durant l'hiver 2011-2012, les deux indices étaient positifs en décembre et début janvier, mais l'OA est devenu négatif à partir de la mi-janvier et jusqu'au début février. Ce changement a permis à de l'air arctique d'envahir l'Europe centrale et de l'Est, où il a apporté un temps très froid et neigeux. En même temps, la Niña a entraîné des conditions très froides et neigeuses en Alaska. La Niña a aussi influé sur la trajectoire du courant-jet dans le Nord des États-Unis, permettant à de l'air doux du golfe du Mexique de remonter sur l'Est des États-Unis.



Banquise antarctique : une dynamique différente

Si le déclin accéléré de la banquise Arctique a été depuis quelques années la une des journaux, en particulier à l'occasion de l'été 2012, le minimum d'extension estivale, la situation de l'autre côté de la planète semble bien différente.

Le suivi satellitaire de l'extension des glaces de mer antarctiques sur la période 1979-2012 montre même une faible tendance positive pour l'extension spatiale à certaines saisons (une hausse de 0,1 pour cent par an en automne, mais une baisse de 0,08 pour cent par an en hiver). Ces tendances sont toutefois peu significatives, en raison des fortes fluctuations interannuelles et de l'importante variabilité spatiale. En particulier, le déclin est marqué autour de la péninsule Antarctique et de

nant l'épaisseur, autre paramètre crucial pour juger l'évolution de la couverture de glace, on ne dispose pas, dans l'hémisphère Sud, de données suffisamment de données dans l'hémisphère Sud pour établir une quelconque tendance. Ce qu'il en soit, aucun déclin généralisé de la banquise australe n'est observé, contrairement à l'Arctique.

Les raisons de ces différences, encore mal comprises, sont diverses. En premier lieu, la différence de l'Arctique où, du moins jusqu'aux années 1980, la majeure partie du bassin demeurait prise par les glaces toute l'année, la banquise arctique est saisonnière, réduite en étendue depuis longtemps. Cette banquise saisonnière subit des fluctuations interannuelles importantes, fait de sa plus faible « inertie », ce qui

phie et de la circulation atmosphérique australe. L'Antarctique, entouré d'un océan, implique que les glaces de mer sont en « dérive libre ». Cela signifie qu'elles sont emportées par les vents de surface alors que la glace de l'Arctique est bloquée par les côtes canadiennes et groenlandaises proches, ce qui crée des efforts mécaniques internes à la glace. La composition vers le Nord de la circulation atmosphérique circum-Antarctique est importante, les glaces de mer peuvent être déportées vers le Nord, ouvrant des zones d'eau libre qui pourront regeler en surface. Cela pourrait expliquer la variabilité régionale constatée.

Enfin, il a été montré récemment que, dans l'Arctique, l'association de

banquise australe, la mécanique des glaces joue un rôle plus limité sur l'évolution globale en Antarctique.

Par ailleurs, et paradoxalement, l'accroissement (très relatif) des glaces de mer antarctiques résulterait du réchauffement climatique ! En effet, dans les zones polaires, un réchauffement peut renforcer les précipitations neigeuses qui participent au bilan positif de masse de la banquise en l'épaississant par-dessus. Ce mécanisme est souvent évoqué également pour les glaces continentales. En conclusion, la banquise australe ne joue pas le rôle de sentinelle du changement climatique. La banquise boréale, son absence d'évolution marquée n'est pas en contradiction avec le réchauffement global.

Jerome Weiss

Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, (CNRS/Univ. Joseph Fourier), Grenoble

température favorisaient le développement de conditions OA et NAO négatives au cours de l'hiver. Cette situation affaiblirait le vortex polaire et le courant-jet, qui deviendraient moins efficaces pour empêcher les masses d'air arctique froides, avec leur teneur en eau élevée, de s'étendre vers les latitudes moyennes et d'y apporter des épisodes de froid intense et de chutes de neige importantes. De surcroît, un courant-jet affaibli présenterait une trajectoire plus ondulante, et pourrait ainsi enfermer certaines régions dans un régime froid pendant une durée importante. Combinés, ces motifs perturbés de circulation atmosphérique tendraient à provoquer des épisodes de froid hivernal plus fréquents et plus longs en Amérique du Nord et en Europe.

D'autres facteurs peuvent jouer un rôle. Il en est ainsi du phénomène d'oscillation australe El Niño ou ENSO (*El Niño Southern Oscillation*). Il s'agit d'une autre oscillation climatique puissante touchant l'océan Pacifique tropical, un phénomène très irrégulier dont la période évolue entre deux et sept ans : un réchauffement des eaux de surface de l'Est de l'océan Pacifique tropical (événement El Niño) s'accompagne de hautes pressions atmosphériques dans le Pacifique Ouest ; inversement, un refroidissement des eaux à l'Est de l'océan Pacifique (événement

La Niña) s'accompagne de basses pressions dans le Pacifique Ouest.

L'impact de l'Oscillation australe El Niño/La Niña se ressent jusque sur la côte Est des États-Unis, où le courant-jet se décale vers le Sud au cours des années El Niño, ce qui entraîne un temps hivernal plus froid et humide. Inversement, le courant-jet se décale vers le Nord au cours des années La Niña, ce qui produit un hiver plus doux et sec dans cette même région.

Réunis, les conditions d'indices OA et NAO négatifs pendant les années El Niño pourraient renforcer le risque d'hivers froids le long de la côte Est des États-Unis ; c'est ce qui s'est produit en 2009-2010. Les conditions d'indices OA et NAO négatifs peuvent également s'opposer aux effets de La Niña et empêcher les hivers doux attendus : ainsi, durant l'hiver 2010-2011, les températures basses et les chutes de neige record à New York et à Philadelphie ont surpris les prévisionnistes qui, à partir de l'événement La Niña en cours, attendaient des conditions plus douces.

Les changements dans l'Arctique ont beau suggérer pour l'avenir des vagues de froid plus fréquentes et de durée plus longue, nous ne pouvons jamais savoir avec certitude comment cela se traduira pour une année donnée : les prévisions

BIBLIOGRAPHIE

- J. A. Francis et S. J. Vavrus, Evidence linking arctic amplification of weather in mid-latitude, *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L08101, 2012.
- C. H. Greene et al., A warm card in the weather, *Oceanography*, vol. 25, pp. 7-9, 2012.
- J. E. Overland et al., The recent arctic warm period, *Tellus*, vol. 60(4), pp. 587-597, 2008.
- J. Weiss, Réchauffement climatique, *Dossier Pour la Science*, n° 54, janvier-mars 2007.
- C. H. Greene et A. J. Pershing, Climate drives sea change, *Science*, vol. 315, pp. 1084-1085, 2007.

Les vagues de froid en France

Le réchauffement planétaire observé depuis le début du XX^e siècle est un phénomène bien expliqué par la théorie et bien représenté dans ses grandes lignes par les modèles climatiques actuels. À l'horizon 2100, si les émissions de gaz à effet de serre sont réduites, le réchauffement sera d'un à deux degrés en moyenne, voire trois à quatre degrés sans contrôle des émissions.

Ces dernières années semblent pourtant marquées par des périodes de froid et de neige en Europe, ce qui peut sembler contradictoire avec le réchauffement global observé. Par exemple, la France a connu un mois de janvier 2010 très neigeux avec une température inférieure de près de trois degrés aux normales de saison. Pendant cet hiver 2010, la circulation atmosphérique en Atlantique Nord était caractérisée par la deuxième valeur la plus négative de l'indice NAO jamais observée depuis la fin du XIX^e siècle. Cette configuration favorise une circulation atmosphérique de secteur Nord, apportant froid et humidité.

étaient comparables à celui de 1963, l'un des plus extrêmes du XX^e siècle – et bien plus récents. Le réchauffement global de ces 50 dernières années a sans doute limité le froid de janvier 2010.

Le froid de janvier 2010 s'est abattu sur la France le 14 février 2012 était plus exceptionnel. En termes d'intensité, il s'agit de la cinquième vague de froid la plus sévère observée depuis 1947, même si elle est bien loin des vagues de froid historiques de 1956, 1963 et 1985. Mais, si ces 13 jours ont frappé les esprits, la moyenne des températures de l'hiver 2011-2012 était en réalité proche de la normale. La tendance au réchauffement observée depuis plusieurs décennies sur l'Europe n'est pas remise en cause. Ce n'est d'ailleurs pas non plus le cas aux États-Unis, malgré plusieurs hivers froids et neigeux ces dernières années : sur la période 1896-2012, le climat s'est réchauffé de 0,8 °C.

En attendant que les années à venir confirment ou infirment la tendance au réchauffement du climat sur le long terme, plusieurs études suggèrent que

l'hémisphère Nord serait une conséquence du réchauffement global, et cherchent à en comprendre les causes. Il est possible d'établir un lien entre le recul spectaculaire de la banquise arctique depuis les années 1990 et des événements relativement rares tels que les vagues de froid observées en Europe. D'autres études ont recours à des simulations des modèles climatiques pour permettre en effet de reproduire assez fidèlement le climat moyen, son évolution et certains éléments de la variabilité observée. Mais aucun modèle n'est capable de reproduire les caractéristiques observées d'un hiver particulier sur une région donnée, même en imposant la régression constatée de la banquise. Plusieurs modèles sont cependant capables de simuler correctement les jours à

l'observation, une approche raisonnable pour estimer les risques futurs de vagues de froid est d'utiliser un ensemble aussi large que possible de modèles climatiques. Une étude récente, s'appuyant sur 13 modèles, conclut qu'à l'horizon de 2100, l'Europe de l'Ouest continuera de connaître des vagues de froid, mais moins fréquentes et en général moins intenses qu'aujourd'hui. Il est sans doute encore trop tôt pour établir un lien – ou une absence de lien – entre l'évolution de la banquise et la recrudescence des hivers rigoureux. La prévision saisonnière peut apporter de l'information quelques mois à l'avance sur la probabilité qu'un hiver soit plus froid ou plus chaud que la normale sur une région donnée. Mais cette information ne permet pas de prévoir à l'avance une vague de froid comme celle de février 2010.

Les prévisions météorologiques peuvent être annoncées quelques jours à l'avance.

David Salas y Mélia

David Salas y Mélia

David Salas y Mélia

météorologiques ont toujours une part d'incertitude.

Peut-on prévoir les conditions de l'hiver à venir ?

L'hiver 2011-2012 illustre bien les difficultés de faire des prévisions. Le Centre américain des prévisions climatiques avait annoncé un temps relativement doux dans l'Est des États-Unis en raison du développement d'un phénomène La Niña dans le Pacifique. Les indices OA et NAO étaient positifs au début de l'hiver, mais des conditions d'indice OA négatif sont apparues à la mi-janvier et ont persisté jusqu'au début de février, alors que le NAO restait positif. L'Alaska et certaines régions de l'Europe centrale et de l'Est ont essuyé de grosses tempêtes de neige et enduré un froid polaire, tandis que le temps à l'Est des États-Unis restait inhabituellement doux pour la saison. En effet, alors même que l'indice OA devenait négatif au milieu

de l'hiver, La Niña a dévié le courant-jet plus au Nord que d'habitude au-dessus de l'Amérique du Nord, permettant à l'air chaud du golfe du Mexique de remonter sur l'Est des États-Unis, ce qui a donné le quatrième hiver le plus chaud jamais enregistré. La trajectoire plus septentrionale du courant-jet a aussi apporté des conditions plutôt douces sur l'Atlantique Nord et l'Europe de l'Ouest.

Début mars 2012, un système de hautes pressions atmosphériques puissant et persistant s'est développé sur le Pacifique Est, amplifiant encore davantage ces conditions inhabituelles et produisant des températures record dans tout le Midwest et l'Est des États-Unis. Malgré la persistance de cette chaleur exceptionnelle, il faut noter que d'autres régions de l'hémisphère Nord ont connu un hiver et un début de printemps très froids. En fait, le Centre américain des prévisions climatiques a rapporté que la température globale moyenne pour mars 2012 était la plus basse depuis 1999.

Pour l'hiver 2012-2013, les conditions semblent propices à des vagues de froid

en Amérique du Nord et en Europe. La fonte record de la banquise arctique observée durant l'été 2012 devrait renforcer la probabilité que des masses d'air arctique froid envahissent les latitudes moyennes. Bien qu'il soit difficile de prévoir quelles régions de latitude moyenne seront les plus affectées, les conditions El Niño qui se sont développées dans le Pacifique pendant l'automne 2012 pourraient favoriser un décalage vers le Sud de la trajectoire du courant-jet, augmentant les probabilités d'un hiver froid et rude dans l'Est des États-Unis. La côte Est pourrait être très vulnérable aux redoutables tempêtes de Nord-Est qui apportent un froid vif et beaucoup de neige. Bien que personne ne puisse dire si nous verrons une réédition des vagues de Nord-Est particulièrement froids de l'hiver 2009-2010, l'hiver actuellement en cours succédera à un été et un automne qui ressemblent davantage aux conditions de 2009 qu'à toute autre année depuis 2007, quand la brusque accélération de la fonte de la banquise arctique a eu lieu.

La logique, un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

La logique — prise au sens large — a connu d'incroyables progrès depuis deux siècles : l'infinie variété des infinis, les étranges hyperensembles, l'indécidabilité de Turing, les déconcertants paradoxes probabilistes... Cet ouvrage sur la logique moderne des sciences intéressera autant les mathématiciens que philosophes et curieux, intrigués par le monde abstrait des raisonnements !

Éditions Belin/Pour la Science 2012

200 pages — 27 euros — ISBN 978-2-8424-3113-8



BON DE COMMANDE SCIENCE

à découper et à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du train d'Or • 41350 Vineuil • Tél.: 0805 655 255 • e-mail: pourlasciencevpc@daudin.fr

☐ Oui, je commande l'ouvrage **La logique, un aiguillon pour la pensée** de J.-P. Delahaye.

..... exemplaires × 27,00 € (Réf. 075115) = ... €

Frais de port (4,90 € France – 12 € étranger) + ... €

TOTAL À RÉGLER = ... €

J'indique mes coordonnées :

Nom :

Prénom :

Adresse :

C.P. : Ville :

Pays : Tél. : (facultatif)

Je choisis mon mode de règlement :

☐ par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ par carte bancaire

Numéro :

Date d'expiration :

Cryptogramme :

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 la case ci-contre ☐.

E-mail pour recevoir la newsletter Pour la Science (à remplir en majuscules).

@

LOGIP424

Offre valable jusqu'au 28.0

Petites merveilles

Kate Wong

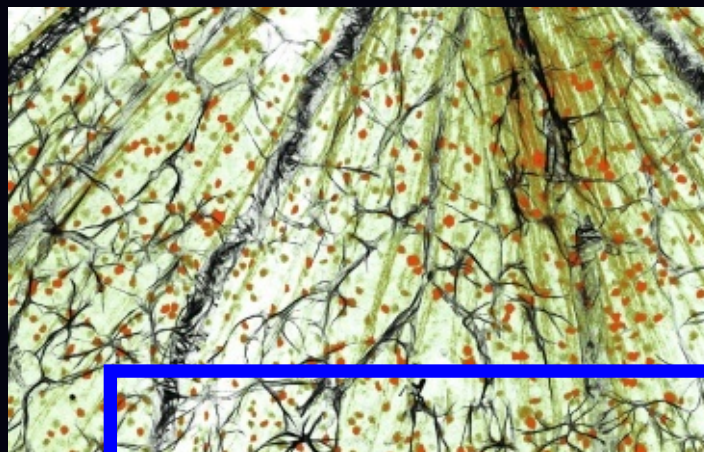
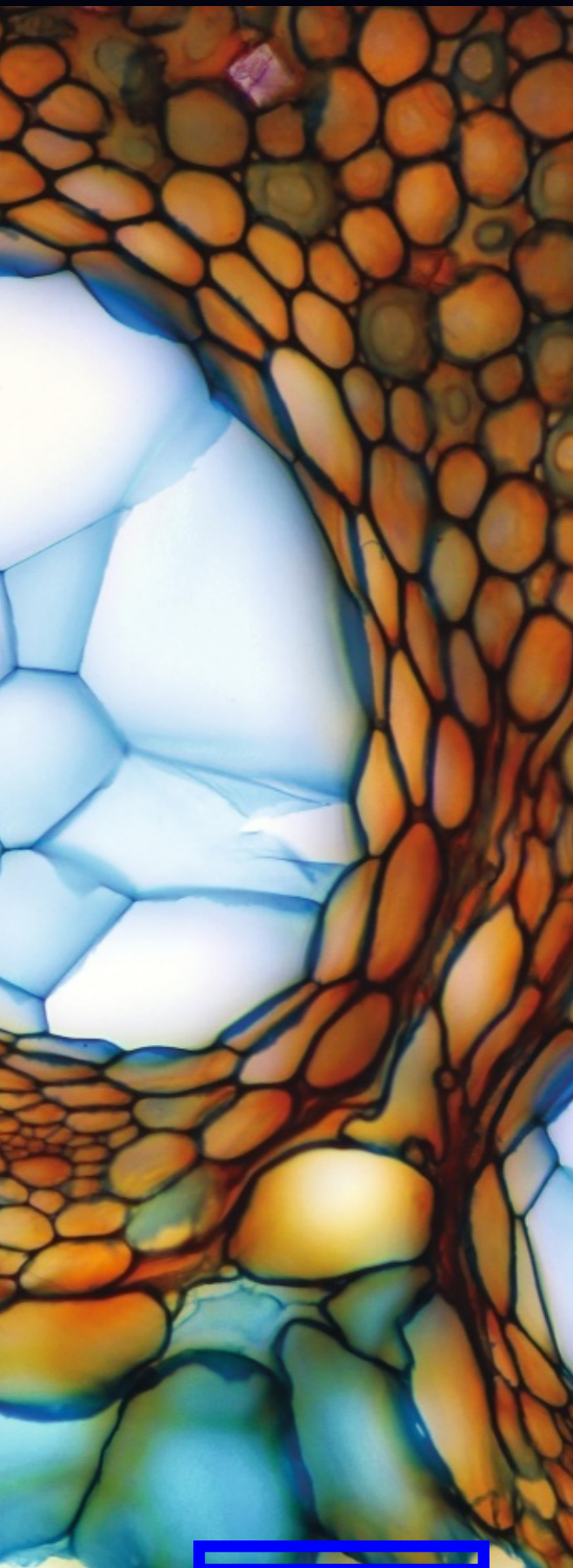
La microscopie optique révèle des splendeurs cachées de la nature.

Les images du concours 2012 d'Olympus le prouvent une fois de plus.

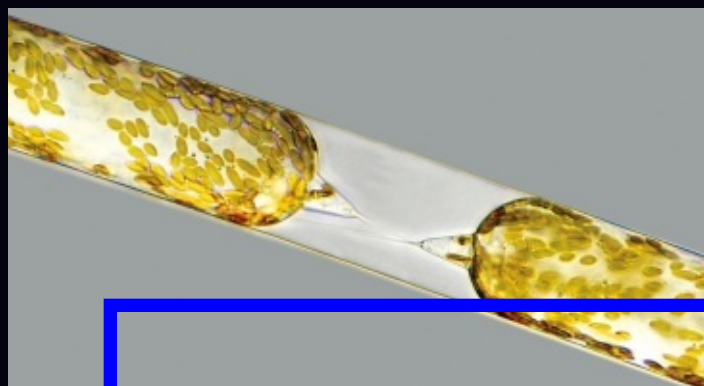
Une coupe transversale de la rétine d'une souris, une mer de poils végétaux en forme d'étoiles couvrant une feuille – les organismes vivants dévoilent sous l'objectif du microscope des facettes souvent spectaculaires. Dans ces mondes minuscules, la beauté émerge aussi bien de l'ingéniosité des solutions sélectionnées par l'évolution aux défis de la vie, que des techniques inventées par les microscopistes pour visualiser des structures et des processus biologiques. En regardant à travers l'oculaire de l'instrument, on découvre tout un univers dans un embryon, un organe ou une cellule. L'un des gagnants du concours 2012 organisé par la Société Olympus (*Olympus BioScapes International Digital Imaging Competition*), Igor Siwanowicz, de l'Institut médical Howard Hughes, en témoigne : « La microscopie me permet de voir au-delà de la cuticule, d'explorer l'étrange disposition des fibres musculaires ou toute la complexité d'un réseau de neurones, et de me rendre compte que la beauté ne se limite pas à la surface des choses. » Les pages qui suivent présentent certaines de ses images et celles d'autres scientifiques ou amateurs, pour le plaisir des yeux.

CELLULES SÉCRÉTRICES D'ALOÏNE. Le botaniste Anatoly Mikhailov, du Centre biologique et écologique des enfants à Omsk, en Russie, étudiait l'anatomie de *Aloe erinacea*, un cactus endémique de la Namibie – une espèce menacée. Grâce à une technique de coloration qu'il a développée, il a pu photographier des cellules (en bleu) qui sécrètent de l'aloïne – un composant de la sève épaisse exsudée par les feuilles de cet *Aloe* lorsqu'on les casse. La taille de l'amas de cellules sécrétrices est ici de 0,3 millimètre.

Pour toutes les images : www.olympusbioscapes.com



ASTROCYTES RÉTINIENS. Cette vue d'une rétine de souris a été obtenue par Alejandra Busco, neurobiologiste à l'université de Tucumán. Elle révèle un réseau d'astrocytes (en noir), des cellules indispensables au bon fonctionnement des neurones (en orange, avec leur axones en vert). Les bras des astrocytes s'enroulent autour des capillaires sanguins.

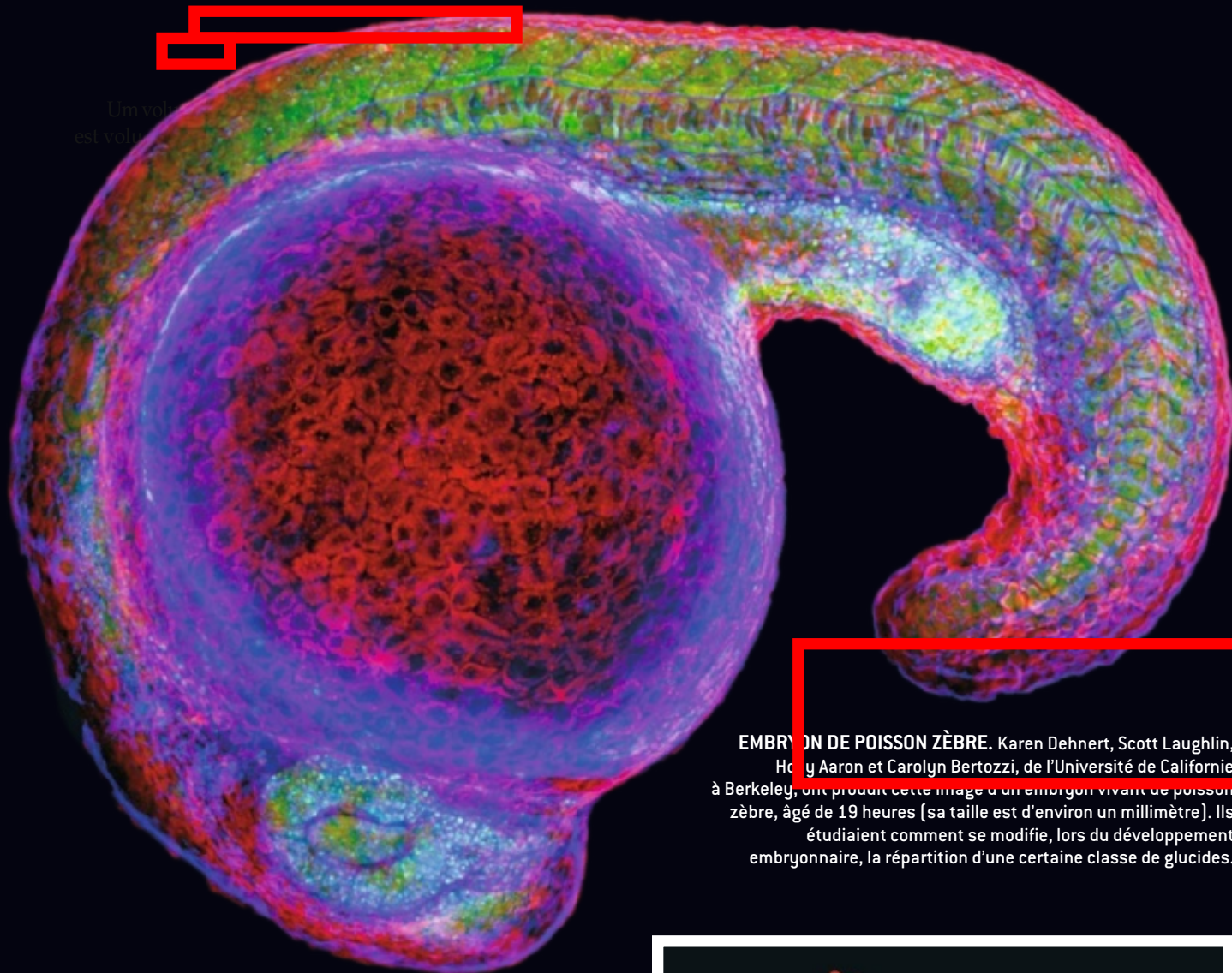


DIVISION D'UNE DIATOMÉE. La diatomée marine *Rhizosolenia setigera* subit ici une division cellulaire, mode de reproduction asexué où une cellule mère donne naissance à deux cellules filles. Les structures dorées sont des chloroplastes, où s'effectue la photosynthèse. Wolfgang Bettighofer, un amateur allemand, a obtenu cette image bien nette en combinant 15 photographies.

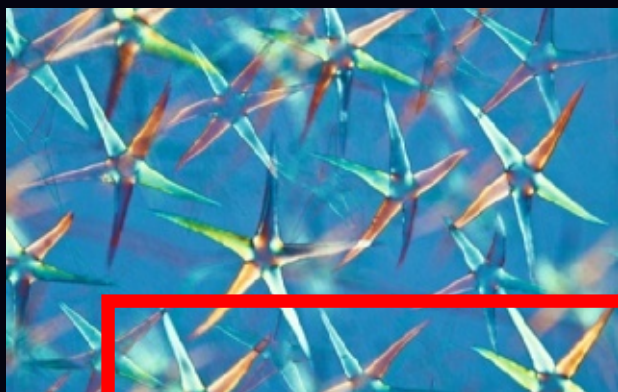


AILE DE PILLON. La beauté abstraite d'une aile de papillon se révèle dans cette image proposée par Saman Khodaverdi, étudiant en biologie végétale à l'Université de Tabriz, en Iran. Les ailes de papillons sont recouvertes de délicates écailles. La couleur et l'iridescence des ailes sont dues à la fois aux pigments des écailles et à l'interaction de la lumière avec leurs microstructures.

Un vol
est volu



EMBRYON DE POISSON ZÈBRE. Karen Dehnert, Scott Laughlin, Holly Aaron et Carolyn Bertozzi, de l'Université de Californie à Berkeley, ont produit cette image d'un embryon vivant de poisson zèbre, âgé de 19 heures (sa taille est d'environ un millimètre). Ils étudiaient comment se modifie, lors du développement embryonnaire, la répartition d'une certaine classe de glucides.



POILS RECOUVRANT UNE FEUILLE. Ces poils en forme d'étoiles tapissent les feuilles de l'arbuste ornemental *Deutzia scabra*. Mesurant un quart de millimètre, ces poils photographiés par Steve Lowry constituent une protection contre les animaux qui broutent, le vent, le gel et le rayonnement ultraviolet. Les jardiniers utilisent les feuilles de cet arbuste pour un polissage de qualité.



SPORANGES DE FOUGÈRE. Le dessous des feuilles de fougères présente de petits amas sombres nommés sores. Chaque sore regroupe des « sporanges » qui contiennent plusieurs spores. Le neurobiologiste Igor Siwanowicz a visualisé avec des colorants fluorescents un amas de sporanges (structures multicolores) de la fougère *Polypodium virginianum*. La taille de l'amas est d'environ un millimètre.

Retrouvez plus d'images sur
www.pourlascience.fr





CHENILLE DE PAPILLON. Dans cette seconde micrographie de I. S. Janowicz, une chenille de papillon nocturne de la famille des Limaconides se prépare à s'envelopper d'un cocon de soie, pour le dernier stade de sa métamorphose en insecte adulte. Chaque œil (en haut) présente six lentilles en forme de dôme, qui confèrent une vision rudimentaire. Les adultes, eux, ont des yeux à facettes.

La sélection de livres

■ POUR LA SCIENCE

Ce mois-ci la sélection de *Pour la Science* vous donne matière à réfléchir sur le climat, les écrans, le plus impressionnant des grands singes ou encore les découvertes mathématiques récentes.

L'enfant et les écrans

Avis de l'Académie des sciences

Jean-François Bach, Serge Tisseron, Olivier Houdé et Pierre Léna

La question de l'impact des écrans sur notre cerveau est au cœur des préoccupations. Comment la pratique intensive des nouvelles technologies amène les utilisateurs à adopter d'autres façons de penser, de sentir, d'agir ? L'Académie des sciences rend son rapport, le premier en France – sur l'effet des écrans sur le cerveau des enfants.

Nouveauté

L'enfant et les écrans

AVIS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

Ref. 09064*

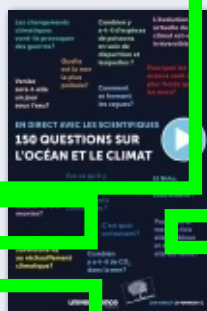
Editions Le Pommier 2013
140 pages – 15 euros – ISBN 978-2-7465-0649-7

150 questions sur l'océan et le climat

En direct avec les scientifiques

Collectif

Comment se forment les vagues ? Les ours polaires survivront-ils au réchauffement climatique ? Venise sera-t-elle un jour sous l'eau ? Les changements climatiques vont-ils provoquer des guerres ? Que sera la mer la plus polluée ?... En tout, 150 questions et leurs réponses accessibles et ludiques.



Ref. 090643*

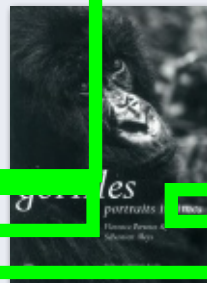
Editions Le Pommier 2012
224 pages – 15 euros – ISBN 978-2-7465-0643-5

Gorilles

Portraits intimes

Florence Perroux, Sébastien Meys

« Croiser le regard d'un grand singe est une expérience singulière qui laisse rarement indifférent. » Côtayant et photographiant les singes anthropoïdes depuis plusieurs années, les auteurs ont envie de nous faire découvrir le plus impressionnant mais aussi le plus sensible de nos cousins simiesques : le gorille.



Ref. 090646*

Editions Le Pommier 2012
144 pages – 29 euros – ISBN 978-2-7465-0646-6

Théorie élémentaire des feuilletages holomorphes singuliers

Dominique Cerveau, Julie Déserti, Felipe Cano

Nouveauté Ce livre est une introduction à la théorie des feuilletages holomorphes, des objets qui servent à implanter la théorie des équations différentielles classiques

tés complexes. Il présente de nombreux exemples et développe les résultats théoriques clés.

Ref. 007484
Éditions Belin 2013
240 pages – 32,50 euros – ISBN 978-2-7011-7484-6

Éléments d'analyse avancée 1

Nikola Nikol'ski

Voici le premier ouvrage d'une série de 6 tomes, véritable initiation à l'analyse mathématique moderne. Il est une introduction à la technique des espaces de Hardy, du nom de G.H. Hardy longtemps professeur à Cambridge et mentor du géomètre indien des mathématiques, S. Ramanujan. Développée au début du XX^e siècle, la technique des espaces de Hardy est devenue la plus puissante dans de nombreuses applications.



Ref. 006348

Éditions Belin 2012
240 pages – 29,50 euros – ISBN 978-2-7011-6348-2

En partenariat avec les éditeurs



Tous ces livres sont également disponibles en librairie.

HISTOIRE DES SCIENCES

La définition de la mort

Comment être certain de ne pas inhumer un individu encore vivant ? Au XIX^e siècle, cette question est au cœur des réflexions des médecins légistes. En témoignent les multiples stratégies imaginées pour mettre au point un diagnostic fiable de mort.

Isabelle PLU

M. l'abbé Prévôt, frappé le 23 novembre 1763 d'une attaque d'apoplexie dans la forêt de Chantilly, fut ouvert, par ordre de la justice, pour reconnaître son genre de mort. Au premier coup de scalpel, l'abbé poussa un cri qui annonça qu'il était encore de ce monde ; mais c'était trop tard, le coup pour l'en faire sortir était porté.

J.-B. Desgranges, *Mémoire sur les moyens de perfectionner l'établissement public formé à Lyon en faveur des personnes noyées*, 1790.

Faire le diagnostic d'un décès, c'est-à-dire attester qu'une personne est décédée, a longtemps été un problème épineux pour le médecin. Quant au médecin légiste, chargé d'éclairer la justice sur des points particuliers tels que les causes de mort, il n'avait pas plus de certitude en la matière, et ce jusqu'au XX^e siècle. Comment définir la mort ? Quels signes sont caractéristiques du décès ? Le diagnostic n'est devenu certain qu'avec l'avènement de l'électrocardiogramme et des techniques de réanimation. Auparavant, nombreuses avaient été les réflexions sur le sujet.

Le diagnostic du décès d'une personne a toujours été d'une importance capitale pour sa famille, notamment pour des raisons successorales. Mais encore plus effrayant que la mort elle-même, un phénomène focalisait toutes les craintes : l'inhumation prématurée. C'est ainsi qu'en Allemagne ou en Italie, à la fin du XVIII^e siècle, existaient des « obitoires » ou « chambres mortuaires d'attente », où étaient déposées les personnes apparemment

mortes. Une ficelle munie d'une clochette était nouée à leur main, afin que leur « réveil » alerte le gardien des lieux.

Au XIX^e siècle, plusieurs cas rapportés au siècle précédent par les médecins Jean-Baptiste Buhier et Jacques-Bénigne Winslow dans leur *Dissertation sur l'incertitude des signes de la mort* (1742) incitent à la vigilance : « Il ne faut pas croire [...] que les méprises auxquelles la mort apparente peut donner lieu soient aussi fréquentes que le pense le vulgaire ; mais puisque des exemples authentiques en démontrent la possibilité, l'humanité n'ordonne-t-elle pas de prendre pour les éviter les précautions que la prudence peut suggérer ? », plaide le médecin légiste Joseph Brand en 1821 dans son *Manuel de médecine légale*. D'autres médecins, tel Alexandre Lacassagne, avouent leur impuissance : « Malgré le grand nombre de signes de mort qui ont été donnés, il est parfois bien difficile de s'assurer si elle existe réellement » (*Précis de médecine judiciaire*, 1886).

Une loi sans cesse remaniée

La législation de la déclaration des décès rend compte de ces incertitudes. Selon l'article 77 du code civil de 1804, « aucune inhumation ne sera faite sans une autorisation, sur papier libre et sans frais, de l'officier d'état civil, qui ne pourra la délivrer qu'après s'être transporté auprès de la personne décédée, pour s'assurer du décès, et que 24 heures après le décès, hors les cas prévus par les règlements

de police ». Mais les officiers d'état civil ont pour instruction de se faire assister par un médecin, notamment pour dépister une mort suspecte. Il est recommandé aux officiers d'état civil de donner délégation à un médecin en vue de constater le décès. En effet, le médecin est plus particulièrement qualifié par ses connaissances professionnelles pour relever, s'il y a lieu, les signes ou indices de mort violente et provoquer, en application de l'article 82 du code civil, le refus du permis d'inhumer. Ainsi un « médecin d'état civil » reçoit-il un mandat de visite de l'officier d'état civil afin d'examiner le défunt.

Dans plusieurs villes – notamment à Paris –, cette législation est complétée de circulaires instaurant des médecins « vérificateurs ». Ces médecins sont chargés de constater les décès et de s'assurer du respect de la législation et de la réglementation funéraire, en particulier sur la conservation du corps : « Le corps doit rester dans toutes les conditions de chaleur et d'air susceptibles de faciliter le retour à la vie. » Le corps doit être allongé dans son lit, et non sur un sommier de paille ou de crin ; on ne doit pas lui couvrir ou lui envelopper le visage, ni l'exposer à un air trop froid.

En 1856, la vérification des décès devient obligatoire sur tout le territoire français, mais ce n'est qu'en 1960 qu'apparaît le certificat de décès : selon l'article 77 du code civil de 1804 modifié, l'officier d'état civil ne peut délivrer une autorisation d'inhumation « que sur production d'un certificat établi par un médecin qui aura chargé de s'assu-

rer du décès. » Désormais, le diagnostic de mort ne repose plus sur l'officier d'état civil, mais sur le médecin.

Les difficultés des médecins à diagnostiquer la mort venaient du fait que, jusqu'au XIX^e siècle, selon l'état des connaissances médicales, on distinguait deux états de mort : la mort apparente et la mort réelle. La mort apparente résultait d'une syncope prolongée avec relâchement musculaire, perte de connaissance, arrêts cardiaque et respiratoire ou activité cardiaque et respiratoire faibles. Surtout, elle était réversible. La mort réelle, quant à elle, faisant suite à la mort apparente, devenait irréversible du fait de lésions organiques et vasculaires. L'art du médecin était de discerner dans la mort celle qui n'était qu'apparente de celle qui était réelle.

La notion même de mort était définie de façons diverses selon les médecins et les époques. En 1881, l'Autrichien Eduard

von Horneyn écrivait, dans ses *Nouveaux éléments de médecine légale* : « Un individu est mort à partir du moment où la respiration et l'activité du cœur s'arrêtent d'une façon durable. » Une trentaine d'années plus tard, Charles Vibert disait quant à lui : « La mort est caractérisée par l'arrêt des grandes fonctions vitales de l'organisme : respiration, circulation, sensibilité cutanée et sensorielle, motricité. »

Mort apparente ou mort réelle ?

À partir de ces définitions, la médecine a cherché à identifier des signes cliniques permettant de diagnostiquer la mort avec certitude. Dans son ouvrage de 1821, Briand

décrit, commente et critique différents signes retrouvés sur le cadavre – les signes cadavériques. Aucun ne semble permettre un

L'AUTEUR



Isabelle PL est médecin légiste à l'Institut médico-légal de Paris.

À ÉCOUTER

Jeudi 14 février, l'émission **La marche des sciences**, sur France Culture de 14h à 15h, sera consacrée au rapport des médecins à la mort aux XVIII^e et XIX^e siècles. www.franceculture.com



1. PARIS, 1874. À la pointe de l'île de la Cité, derrière le chevet de Notre-Dame, la morgue expose les cadavres qui n'ont pas été identifiés. À cette époque, la salle n'est pas réfrigérée et, malgré un système de

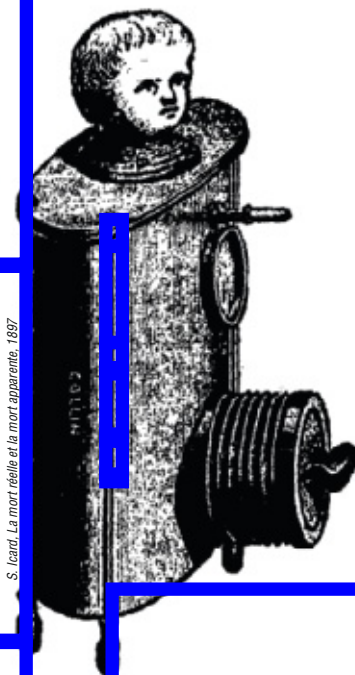
ventilation, un arrosage continu des cadavres avec de l'eau et l'utilisation d'antiputrides à base de chlorure, les corps ne sont pas exposés plus de cinq jours pour limiter la puanteur liée à la décomposition.

diagnostic certain de mort. La face cadavéreuse « n'est point un signe caractéristique, puisqu'on la rencontre pendant la vie, chez des individus épuisés par des maladies chroniques, [...] chez les criminels que l'on conduit au supplice, et chez les malades timorés auxquels on vient d'administrer les derniers sacrements ». L'affaissement et obscurcissement des yeux « ne méritent pas plus de confiance ».

La peau froide et la peau livide « ne sont pas moins équivoques, puisqu'elles peuvent, dans certains cas, être observées chez des individus vivants, et que d'autres fois ces signes ne se manifestent point chez des individus frappés de mort. La peau perd sa chaleur dans les asphyxies par submersion, dans les accès hystériques, etc. ; et qui ne connaît quelles variations les affections vives de l'âme peuvent déterminer subitement dans la coloration et la chaleur du système cutané ? ».

L'absence de circulation et de respiration « ne peuvent seules autoriser à affirmer l'absence de vie [...] L'action du cœur et celle des poumons peuvent [...] rester suspendues pendant quelques temps, comme on l'observe dans la syncope ou la léthargie [...] Les mouvements du cœur et des poumons peuvent devenir si faibles dans quelques circonstances, qu'ils échappent aux sens de ceux qui cherchent à les observer ».

Quant à la rigidité des membres, ou raideur cadavérique, si elle est l'« effet constant de la mort, et par conséquent [...] le plus sûr de tous les signes qui servent à la constater », il ne faut pas la confondre avec l'effet de la congélation : « Quand on fait mouvoir un membre, on entend un bruit produit par la fracture des petits glaçons contenus dans la partie que l'on déplace. » Ni avec la rigidité convulsive : « Dans toutes les affections nerveuses où les membres deviennent roides, le corps est encore pourvu d'un certain degré de chaleur très sensible au thermomètre [...]. Lorsque la rigidité est convulsive, un membre auquel on fait exécuter un mouvement retourne promptement et avec force dans la position où il s'était roidi ; lorsqu'elle est l'effet de la mort, la rigidité une fois vaincue n'oppose plus aucune résistance. »



S. Icard, La mort réelle et la mort apparente, 1897

CE « SIPHOPHORE » fut conçu par le médecin Eugène Voillez en 1876 pour réanimer les noyés et les nouveau-nés en détresse respiratoire (il s'agit du modèle pour enfant). Un soufflet aspirateur crée une dépression qui aspire le cage thoracique et stimule l'inspiration.

BIBLIOGRAPHIE

- J. Briand, Manuel de médecine légale, 1821, réédition Nabu Press, 2012.
- I. Plu et D. Lecomte, Médecine légale, dans M. Agrapart et al., Pratiques de la criminologie : Analyse comportementale, victimologique, médico-légale et expertise judiciaire, Panorama du droit, Stabius, 2012, pp. 119-141, 2010.
- C. Simonin, Médecine légale, judiciaire, thèse, 1940.
- C. Vibert, Principes de médecine légale, J.-B. Baillière et fils, 1917.
- S. Icard, La mort réelle et la mort apparente, Félix Alcan, 1897.

La putréfaction semble le seul signe certain : « Peu satisfait de la valeur des signes que nous venons d'examiner, Bruhier conclut que le seul signe de mort réelle auquel on puisse se fier est le commencement de la putréfaction des cadavres. » La prudence est de mise. Lacassagne conclut avec sagesse sur ces signes diagnostiques : « La mort est certaine quand il y a un délai de 48 heures, que des examens répétés ont montré l'absence des bruits du cœur, et que l'on a constaté la rigidité cadavérique, le thermomètre dans l'aisselle à 25°C et la tache verte des parois abdominales [cette coloration verte du bas du ventre est le premier signe d'altération du corps] ».

Des tests chimiques

Quelques décennies plus tard, en 1917, Vibert confirme ces signes, mais introduit aussi l'idée de compléter l'examen clinique par des épreuves paracliniques : « Il faudra bien rarement un délai de plus de 24 à 36 heures pour avoir constaté, après tous les signes immédiats, l'établissement graduel de la rigidité cadavérique, la chute de la température à 20°C, qui ne laisseront place à aucun doute, signes auxquels on peut ajouter l'épreuve à la fluorescéine. » Imaginé par le médecin Séverin Icard en 1897, ce procédé consiste à injecter une solution d'un colorant, la fluorescéine ammoniacale, en intraveineuse ; la mort est considérée comme assurée lorsque la conjonctive de l'œil ne prend pas la coloration jaune de la fluorescéine après dix minutes d'observation, signe que le sang ne circule plus.

Au XIX^e siècle et dans la première moitié du XX^e siècle, les médecins ont développé de nombreuses méthodes cliniques de diagnostic de la mort. Pour mettre en évidence l'arrêt des battements du cœur, l'auscultation cardiaque doit être réalisée durant 5 minutes, puis renouvelée 30 minutes plus tard. Pour assurer l'arrêt de la respiration, d'une part, on recherche des traces de souffle respiratoire en apposant une plume, un duvet, une flamme ou un miroir devant la bouche ; d'autre part, on détecte les mouvements respiratoires en posant un verre d'eau sur la région épigastrique. L'examen de l'œil aide aussi parfois

1746 La morte-vivante de la Salpêtrière

Au mois de février 1746, une fille de la campagne d'un tempérament très vigoureux, âgée d'environ 25 ans, parut à pied de l'Hôtel-Dieu de Paris où elle était accouchée la veille, et vint à la Salpêtrière. Elle avait craint d'être attaquée d'une maladie qui régnait alors à l'Hôtel-Dieu sur les femmes en couches et qui en fit périr plusieurs. Elle fut mise au lit, et les serviettes chaudes, et on parvint par quelques cordiaux à la faire respirer de sa faiblesse. Au bout d'une heure, elle retourna dans le même état; et on la crut morte. La sœur du dortoir m'envoya dire qu'il y avait dans son emploi un sujet dont on pouvait disposer pour la faire examiner. Mes élèves ne manquèrent point de se lever et de venir m'enlever le sujet, qui fut transporté dans l'amphithéâtre pour l'examiner. Le lendemain matin avant la visite des malades, un jeune chirurgien me dit qu'il avait entendu des sons plaintifs dans l'amphithéâtre comme si quelqu'un y eût poussé des sanglots et des profonds soupirs. Je me levai et j'allai voir cette pauvre fille, qui alors était véritablement morte, avait fait des efforts pour se débarrasser du drap qui l'enveloppait: elle avait une jambe par terre hors du lit, et elle était appuyée sur la paroi du treteau d'une table à disposition de la quelle le brancard était posé.

Antoine Louis

Lettres sur la certitude des signes de la mort, où l'on rassure les citoyens de la crainte d'être enterrés vivants, 1752

au diagnostic: déformation ovulaire de la pupille à la compression (signe de Jodl) ou arrêt de la circulation rétinienne à l'examen à l'ophtalmoscope.

Des épreuves invasives ont aussi été mises au point pour affirmer le diagnostic: piqûres, frictions ou brûlures cutanées dans les régions les plus sensibles du corps visent à produire une réaction douloureuse, signe de vie persistante; la ponction cardiaque consiste à introduire une aiguille en région cardiaque. Immobile, elle témoigne de l'absence de battement cardiaque et donc d'une mort réelle; si au contraire elle s'anime de mouvements – impulsés par les battements du cœur –, l'individu n'est qu'en mort apparente. Parfois même, une incision cardiaque est pratiquée, bien que critiquée: « Un chirurgien qui trouverait le cœur palpitant aurait-il à s'applaudir de son expérience ? » écrit Briand en 1821.

Enfin, les épreuves chimiques font l'objet de publications. Le test à l'hydrogène sulfuré développé par Icard en 1906 consiste à fixer devant les narines du corps un morceau de papier blanc sur lequel ont été tracées à l'avance des inscriptions avec une solution d'acétate neutre de plomb. Initialement invisibles, ces inscriptions se colorent en noir quand l'hydrogène sulfuré produit par le corps en putréfaction débutante (avant même l'apparition de la tache verte abdominale) transforme l'acétate en sulfure de plomb.

La réaction alcaline au tournesol [citée par le médecin légiste Victor Balthazard en 1921] met en évidence l'acidification

des tissus: le médecin réalise une ponction hépato-ombilicale qu'il dépose sur un papier de tournesol bleu. Ce papier a la propriété de virer au rouge au contact de substances acides. Une ou deux heures après la mort, des taches rose vif commencent à apparaître. La réaction au bleu de bromothymol, citée par Camille Simonin dans son ouvrage *Médecine légale judiciaire* (1946), indique aussi l'acidité des tissus: plus l'acidité est grande, plus le colorant vire au jaune, en passant par le bleu vert et le vert.

Mort cérébrale et arrêt cardiaque

Dans la seconde moitié du XX^e siècle, la définition de la mort évolue. Les connaissances médicales et des techniques de réanimation font entrevoir en la mort un phénomène progressif, c'est-à-dire, entre la mort apparente et la mort réelle (qualifiée aussi d'absolue ou de totale), un état intermédiaire: un état de mort apparente où la circulation est suspendue de façon prolongée, sans retour spontané à la vie en l'absence de réanimation. C'est à la même époque qu'est défini l'état de coma dépassé. Se dessine alors la double composition de la mort, que le médecin Léon Dérôme décrit ainsi dans ses *Éléments de médecine légale* (1978): « L'arrêt des rouages généraux aboutissant à la mort se réduit à deux grands mécanismes: l'arrêt circulaire

et la mort consécutive du cerveau; l'atteinte du cerveau et des centres respiratoires, et l'arrêt secondaire du cœur. »

Le législateur impose des épreuves invasives pour le diagnostic de la mort en milieu hospitalier. Ainsi, la circulaire ministérielle du 3 novembre 1948 stipule que deux médecins doivent avant de certifier le décès, réaliser une artériotomie radiale, c'est-à-dire sectionner l'artère radiale, avec à disposition tout le matériel pour réaliser une suture artérielle. Le saignement qui en résultait était en jet pulsé si la mort n'était qu'apparente, faible et en nappe en cas de mort réelle. Le médecin devait alors confirmer ce signe avec la section de deux autres artères.

L'épreuve de l'artériotomie était complétée par l'épreuve à la fluorescéine d'Icard. Celle-ci fut remplacée en 1958 par le signe de l'éther de Rebouillat: après injection sous-cutanée d'un à deux millilitres d'éther, la solution ressortait en jet lors du retrait de l'aiguille en cas de mort réelle, et diffusait dans les tissus en cas de mort apparente.

Aujourd'hui, ces tests sont tombés en désuétude. Le diagnostic de la mort n'est plus du ressort du médecin légiste, mais du réanimateur, grâce à l'électrocardiogramme, aux tests paracliniques réalisables désormais lors des interventions extra-hospitalières et après manœuvres de réanimation sur une durée qui varie selon le délai de prise en charge, la cause supposée de l'arrêt cardiaque, l'âge du sujet et ses antécédents. La question n'est plus « Est-il bien mort ? », mais « Quand est-il mort ? ». L'intervention

du médecin légiste n'a d'intérêt que pour dater la mort et rechercher des signes de mort suspecte.

LOGIQUE & CALCUL

Le problème de la fabrique de briques

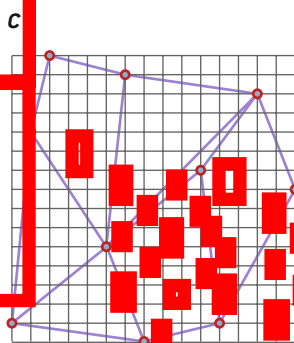
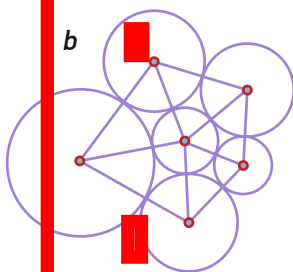
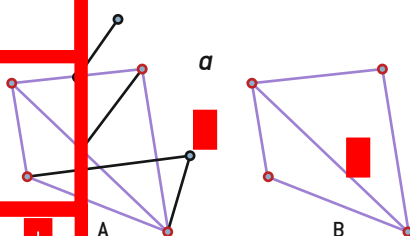
En poussant des chariots de briques, en dessinant des réseaux urbains ou des circuits électroniques, on est confronté au difficile problème du nombre de croisements dans un graphe.

Jean-Paul DELAHAYE

Dessinez cinq points sur une feuille, puis essayez de les joindre deux à deux par des courbes en évitant que deux courbes ne se croisent : vous n'y arrivez pas. Et si vous tentiez plutôt de joindre trois points A, B, C à trois autres D, E, F sans croisement ? Vous n'y arrivez pas non plus ! Et l'on peut démontrer ces impossibilités (voir l'encadré 2)...

Le premier problème revient à établir que K_5 (le graphe à cinq nœuds où chacun est relié à tous les autres) n'est pas un graphe planaire, c'est-à-dire qu'il ne peut pas être dessiné sur le plan sans croisement. Le second consiste à démontrer que $K_{3,3}$ (le graphe obtenu en reliant trois points à trois autres de manière systématique) n'est pas un graphe planaire. C'est un vieux problème de divertissement mathématique popularisé par l'Américain Sam Loyd en 1903, mais dont l'origine est sans doute plus ancienne. On le présente en général sous la forme suivante : trois maisons se branchent chacune au gaz, à l'électricité et à l'eau ; les canalisations reliant les maisons et les fournisseurs peuvent-elles ne pas se croiser ?

Derrière leur aspect innocent, ces énigmes cachent des problèmes difficiles, des conjectures que personne ne sait prouver et des questions algorithmiques ayant un réel intérêt pratique pour le dessin des circuits électroniques ou la représentation optimale de réseaux en informatique.



Il est tout à fait remarquable que les deux graphes non planaires envisagés plus haut (K_5 et $K_{3,3}$) soient caractéristiques de la « non-planéarité ». Un théorème démontré par le Polonais Casimir Kuratowski en 1929 affirme en effet qu'un graphe est planaire si et seulement si on ne peut en extraire aucun graphe de type K_5 ou $K_{3,3}$ (un graphe B est extrait d'un graphe A si, en enlevant des arcs et des nœuds de A, on trouve le dessin de B, voir la figure a).

Dit autrement : si un graphe n'est pas planaire, on trouve l'un des deux graphes K_5 ou $K_{3,3}$ (ou les deux), et si c'est impossible, alors il est planaire.

Des cercles tangents

Un théorème très surprenant sur les graphes planaires a été démontré en 1936 par Paul Koebe. Il indique qu'un graphe est planaire si et seulement si c'est « un graphe de pièces de monnaie », c'est-à-dire si et seulement si l'on peut trouver des pièces de monnaie de diamètres variés qui, serrées les unes contre les autres, dessinent le graphe en question, les centres des pièces étant les nœuds du graphe et un arc joignant chaque couple de pièces en contact (voir la figure b).

On déduit du théorème de Koebe un autre théorème, qui est en fait le contraire indépendant : un graphe est planaire si et seulement si on peut le dessiner sur un plan en reliant

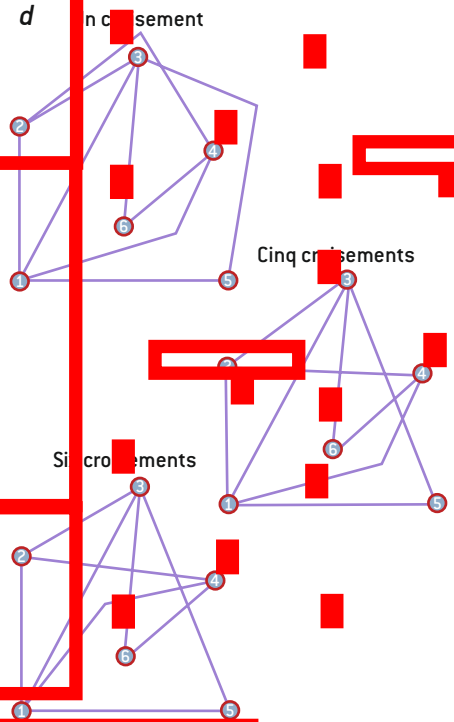
les nœuds par des segments de droite qui ne se croisent pas. Aussi compliqué que soit un graphe planaire, on peut toujours le dessiner sur un plan sans recourir à des arcs courbes.

On connaît des algorithmes rapides (dont le temps de calcul est proportionnel au nombre d'arcs) qui déterminent automatiquement le dessin des graphes planaires avec des segments de droite. De plus, certains d'entre eux n'utilisent, pour poser les nœuds, que les points d'une grille carrée de côté m , où m est le nombre d'arcs du graphe planaire (voir la figure c). Ces algorithmes sont utiles pour le dessin des circuits électroniques où l'on évite que les fils d'un circuit se

de K_5 et $K_{3,3}$, de même que celui de $K_{3,3}$ (ils ne sont pas planaires et on sait les disposer de façon à ce qu'il n'y ait qu'un seul croisement). Qu'en est-il pour K_6 , K_7 , et plus généralement pour K_n (le graphe complet à n nœuds) et $K_{m,n}$ (le graphe reliant n points à m autres points des nm façons possibles) ? Nous verrons que ces énigmes sont d'une incroyable difficulté.

Un même graphe peut être dessiné plus ou moins adroitement et présenter un nombre de croisements plus ou moins grand. La figure d ci-contre montre le même graphe dessiné avec un, cinq ou six croisements. Si vous regardez attentivement ce dessin, vous n'y trouverez ni K_5 ni $K_{3,3}$; c'est donc qu'il est planaire et qu'on peut le dessiner sans aucune intersection. Cherchez ce dessin sans croisement (voir la figure g en fin d'article).

Pour être certain qu'il n'y ait pas de malentendu, nous décrirons les règles de constitution des graphes et du décompte des croisements. Les graphes que nous considérons sont non orientés : l'arc AB, est le même que l'arc BA. Par définition,



Faire au mieux

Pour les graphes non planaires, se pose une intéressante question : comment le disposer sur le plan de façon à avoir le moins de croisements possibles ? La meilleure disposition d'un graphe G sur le plan possède un nombre minimum de croisements noté $cr(G)$. Le nombre minimum de croisements

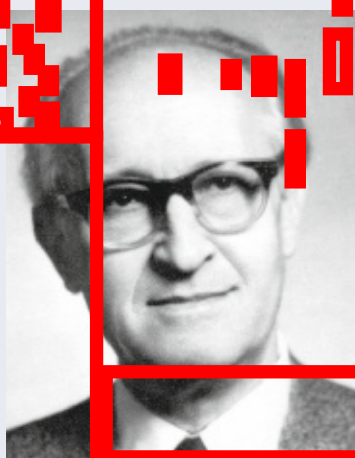
4. Tournant le début du problème des intersections

Dans une lettre à son collègue Richard Guy, le mathématicien hongrois Paul Turán (1910-1976) expliquait comment le problème du nombre de croisements

à quel point il fut concrètement important pour lui à un certain moment de son existence.

En 1944, notre groupe de travail travaillait dans une usine de briques près de Budapest. Notre tâche consistait à transporter des briques à l'aide de petits wagons qui roulaient sur des rails, pour les déplacer des fours où elles étaient cuites vers des entrepôts disposant de places pour les recevoir. Comme il était impossible de savoir à l'avance quel entrepôt recevrait combien de briques, nous étions obligés de transporter à chaque entrepôt le nombre de wagons nécessaires.

wagons chaque jour, aussi avions-nous intérêt à être aussi efficaces que possible. Après avoir chargé les



wagons dans la chaleur des fours, les déchargions doucement et sans trop d'effort.

Le seul problème provenait des

déraillements qui faisaient tomber les briques, ce qui nous donnait du travail supplémentaire et nous faisait



perdre du temps. Ayant eu à pâtir de cela, je me demandais vraiment pourquoi le réseau de rails avait été dessiné de manière aussi peu économique.

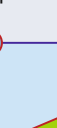
Diminuer leur nombre aurait grandement amélioré la productivité de la fabrique. »

La question du nombre minimum de croisements d'un graphe devint un sujet de recherche mathématique sérieux. Une bibliographie recensant 566 articles a été publiée en 2007. Depuis, quelques dizaines d'articles sont venus s'ajouter à l'énorme liste.

1

tivement aux quatre triplets possibles : ABD, ACD, BCD et ABC. Soit la façon dont on aura placé les points A, B, C et D et les arcs les reliant deux à deux, la situation sera identique : nous aurons le point A

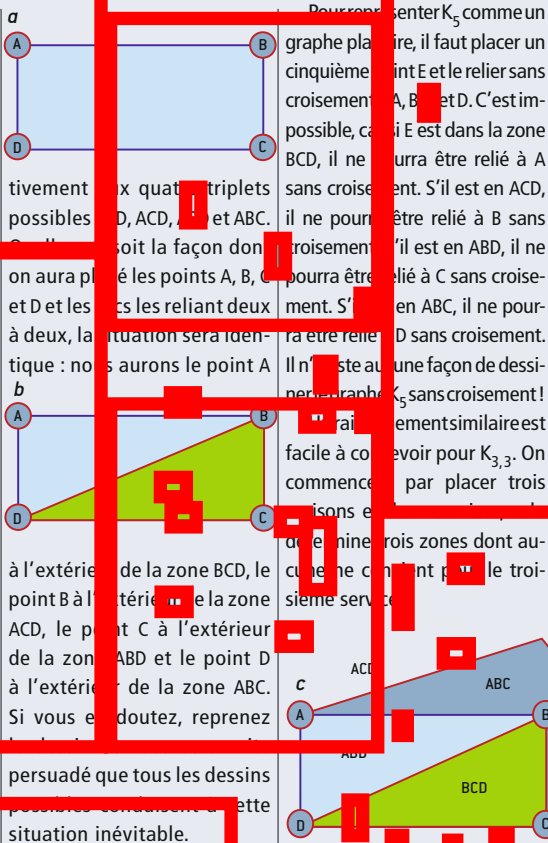
b



à l'extérieur de la zone BCD, le point B à l'extérieur de la zone ACD, le point C à l'extérieur de la zone ABD et le point D à l'extérieur de la zone ABC. Si vous en doutez, reprenez

persuadé que tous les dessins possibles conduisent à cette situation inévitable.

Diagramme de la concurrence parfaite montrant les courbes de demande, offre et coût marginal. L'axe vertical est le prix et l'axe horizontal est la quantité. La courbe de demande (D) est une droite décroissante. La courbe de coût marginal (CM) est une droite croissante. La courbe d'offre (O) est une droite croissante. Le point d'équilibre est à l'intersection de D et O. Le point de production optimale est à l'intersection de CM et O. Les zones ABC, BCD et ACD sont indiquées.

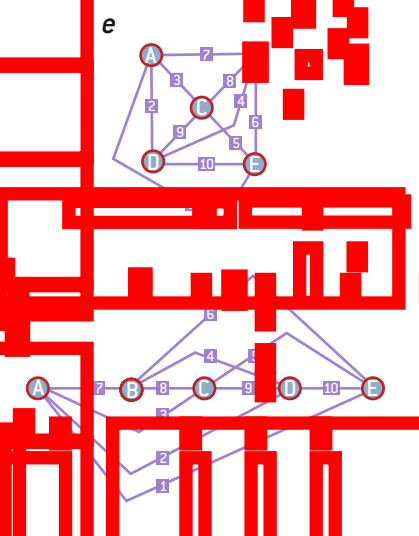


Un exemple est donné sur la figure 1. En déplaçant les nœuds du graphe et en faisant suivre les arcs (sans créer ni supprimer de croisement), on passe continûment d'un dessin à l'autre en conservant le nombre de croisements. Le dessin de départ comporte un croisement (entre les arcs BD et CE), il en comporte un (entre les arcs BD et CE) à l'arrivée. Le nombre minimal de croisements d'un graphe ne dépend donc pas de l'empilement des nœuds.

D'après le théorème de Fáry, tout graphe planaire se dessine sans croisement en représentant les arcs par des segments de droite. Il est donc naturel de se demander, pour les graphes non planaires, si le nombre minimum de croisements est le même quand on impose que les arcs soient des segments de droite, et quand on ne l'impose pas. La réponse est non, en général. De ce fait, on nomme « nombre minimum de croisements multilignes » du graphe G , et on le note $cr'(G)$, le nombre minimum de croisements obtenus en dessinant des segments de droite pour les arcs. On a alors $cr'(G) \leq cr(G)$. Le graphe le plus simple pour lequel $cr(G)$ et $cr'(G)$ sont différents est le graphe K_8 ; il se dessine avec 18 croisements, l'on n'impose pas aux arcs d'être des segments de droite ($cr(K_8) = 18$, voir l'encadré 3) et il oblige à 19 croisements au minimum quand on veut que tous les arcs soient des segments de droite ($cr'(K_8) = 19$).

-

LE NOMBRE MINIMAL DE CROISEMENTS dans un graphe ne dépend pas de l'emplacement des nœuds : on peut ainsi passer continûment du dessin du haut à celui du bas.



le graphe se dessine sur le plan, y compris la zone extérieure) vérifient : $f = 2 - n + a$. La formule se démontre en partant d'un graphe réduit à un seul nœud ($f = 1, n = 1, a = 0$) et en ajoutant étape par étape soit un nouveau nœud avec un arc le reliant à la partie déjà construite sans créer de nouvelles faces (n et a augmentent chacun d'une unité, ce qui préserve l'égalité), soit un nouvel arc reliant deux nœuds déjà présents et créant une nouvelle face (et a augmentent chacun d'une unité, ce qui préserve l'égalité).

Dans les graphes que nous considérons, une face est entourée d'au moins trois arcs, car si une face n'était entourée que de deux arcs, il y aurait deux fois le même arc, ce qui n'est pas autorisé. Chaque arc est sur la frontière de deux faces exactement. Pour entourer les f faces, il faut donc $3f/2$ arcs, au moins, d'où $3f/2 \leq a$. En combinant avec

la formule d'Euler, on a $2 - n + a \leq 2a/3$, ou encore $a \leq 3n - 6$; en particulier, un graphe planaire ne possède jamais un nombre d'arcs supérieur à trois fois le nombre de nœuds.

Considérons maintenant un graphe non planaire G ayant C croisements. En enlevant un à un les arcs qui en rencontrent d'autres, on supprime tous les croisements et on arrive donc, après avoir enlevé C arcs, à un graphe planaire vérifiant l'inégalité vue plus haut qui s'écrit maintenant $(a - C) \leq 3n - 6$. Cela donne, pour $n > 2$, l'inégalité $C \geq a - 3(n - 2)$.

Cette inégalité indique un nombre minimum de croisements pour un graphe ayant n nœuds et a arcs. Si par exemple un graphe comporte 55 arcs et 15 nœuds, on sait qu'il aura au moins $55 - 3 \times 13 = 16$ croisements. Cela ne signifie pas qu'on arrivera à le dessiner avec 16 croisements, car l'inégalité ne prétend pas donner le

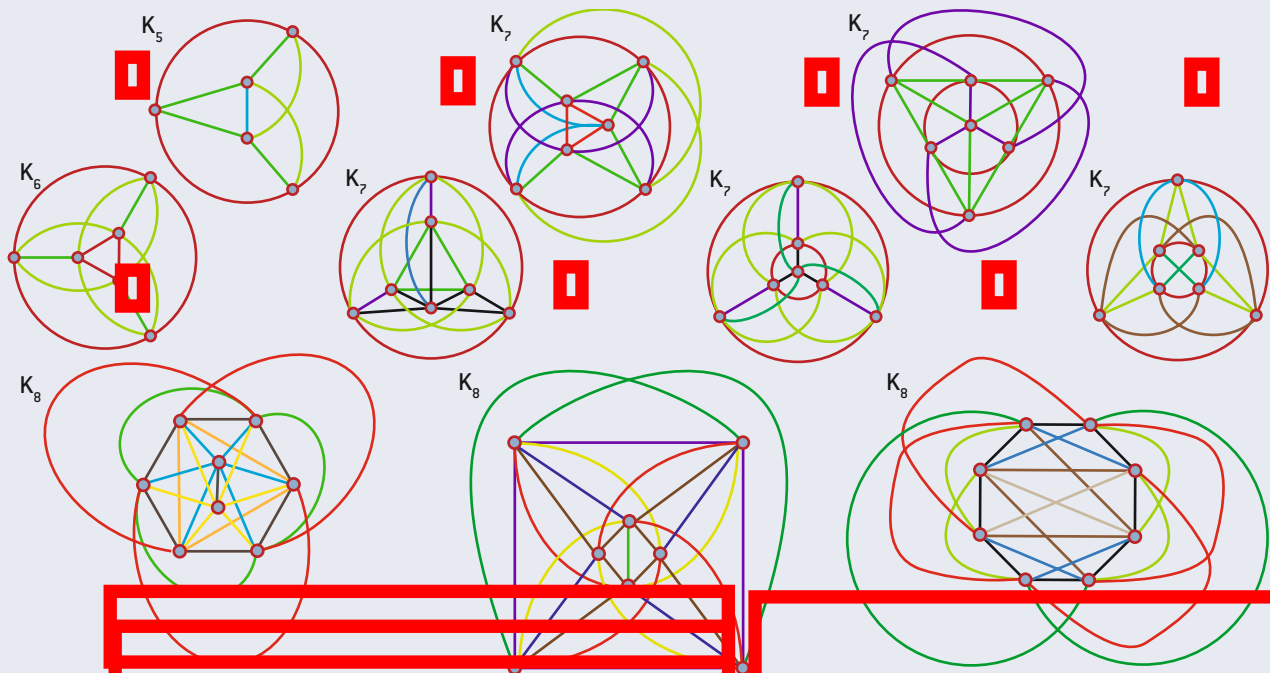
nombre exact de croisements du meilleur dessin, mais un minorant du minimum de croisements inévitables.

En menant d'autres raisonnements, cette inégalité a été améliorée de plusieurs façons, chacune ayant son intérêt selon le graphe considéré : $C \geq 2a/3 - 25(n-2)/3$, $C \geq 3a - 85(n-2)/3$, $C \geq 4a - 103(n-2)/6$, $C \geq 5a - 15(n-2)$ quand $n > 2$, et $C \geq a^3/(64n^2)$ quand $a \geq 4n$.

Preuves et conjectures

Ces inégalités sont certes utiles, mais, au moins dans le cas des graphes simples, on aimerait disposer d'égalités, c'est-à-dire de formules indiquant le nombre minimum de croisements $cr(G)$ qu'on peut obtenir en dessinant le graphe. Le plus simple des graphes à n nœuds est le graphe complet

3. Les meilleurs dessins des graphes K_5 , K_6 , K_7 et K_8



La notation K_n désigne le graphe complet à n nœuds : chaque nœud est relié à tous les autres. Trouver la manière de dessiner ces graphes de façon à limiter le nombre de croisements des arcs reliant les nœuds est loin d'être facile et aucune méthode générale permettant de concevoir les dessins optimaux n'est connue. Les dessins ci-dessus sont les meilleurs possibles pour les graphes K_5 , K_6 , K_7 , K_8 .

Pour les deux dernières valeurs, plusieurs dispositions (topologiquement différentes) donnent le même nombre minimum de croisements. Ces solutions ont été trouvées par Richard Guy et ses collègues, Francesco de Comitè, du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille. Aujourd'hui la question du nombre minimum de croisements des graphes complets n'est résolue que pour $n \leq 12$.

où chaque nœud est lié à tous les autres. On le note K_n et il possède $n(n-1)/2$ arcs. Que sait-on de $cr(K_n)$?

Une formule proposée il y a bientôt 50 ans par Thomas Saaty et Richard Graham indique que $cr(K_n)$ est égal à $7(n)$, soit $1/4 \lfloor n/2 \rfloor \lfloor (n-1)/2 \rfloor \lfloor (n-2)/2 \rfloor \lfloor (n-3)/2 \rfloor$, où les doubles crochets désignent la fonction partie entière (par exemple $\lfloor 3,7 \rfloor = 3$).

Cela donne les valeurs :

n	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$cr(K_n)$	0	1	9	18	36	60	100	150	225	315	441	588	

Cette formule semble bien fonctionner... mais personne n'a su la démontrer ! Il s'agit donc d'une conjecture. On a seulement pu établir que $cr(K_n)$ est inférieur ou égal à $7(n)$. L'égalité a été démontrée jusqu'à $n = 12$, mais cela a demandé un travail considérable. La difficulté provient de ce qu'il existe un très grand nombre de façons de dessiner le graphe sur le plan et qu'il faut surtout ne pas en manquer pour identifier les dessins conduisant à un nombre minimal de croisements.

Les dessins optimaux (voir l'encadré 3) pour K_5 et K_6 ne sont pas trop difficiles à trouver. Pour K_7 et K_8 , cela devient plus subtil, car il n'y a pas unicité de la solution donnant le nombre minimum de croisements. L'idée de

L'ÉNIGME DU CROISEMENT
des arcs d'un graphe
montre que des thèmes que tout le monde peut comprendre concentrent parfois en eux toutes les difficultés possibles.

trouver une disposition optimale de proche en proche en utilisant celle de K_{n-1} pour trouver celle de K_n est mauvaise, car, dans certains cas, les dessins optimaux pour une valeur de n ne contiennent aucun dessin optimal pour $n-1$. Aussi, aller au-delà de 12 est un défi informatique et mathématique.

À défaut d'une démonstration de l'inégalité $cr(K_n) \geq 7(n)$, les mathématiciens ont réussi récemment à démontrer que $cr(K_n) \geq 0,86Z(n)$, inégalité qui s'en approche.

Le nombre chromatique d'un graphe G est le plus petit nombre de couleurs différentes qu'il faut utiliser pour colorier les nœuds du graphe sans que deux nœuds voisins ne soient de la même couleur ; on le note $chr(G)$. On sait, d'après le fameux théorème des quatre couleurs démontré en 1976 par Kenneth Appel et Wolfgang Haken, que pour tout graphe planaire, quatre couleurs suffisent ; autrement dit, si G est planaire, $chr(G) \leq 4$.

Une belle conjecture due à Michael Albertson relie $cr(K_n)$ et $chr(G)$: si G a pour nombre chromatique n , alors son nombre de croisements minimum $cr(G)$ est au moins celui de K_n [$chr(G) = n \Rightarrow cr(G) \geq cr(K_n)$].

En 2009, les Hongrois János Barát et Géza Tóth ont démontré jusqu'à $n = 16$. Là encore on voit que les connaissances dont nous disposons sont remarquablement limitées.

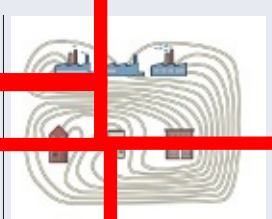
Une autre conjecture du mathématicien hongrois György Hajós affirmait que si le graphe G exige au moins n couleurs ($chr(G) \geq n$), alors G contient le graphe K_n . On a pu l'établir pour $n = 1, 2, 3, 4$. Contrairement aux précédentes conjectures, on a réussi à traiter presque tous les cas... pour finalement montrer que la conjecture est fautive pour tout $n \geq 7$. Les cas $n = 5$ et $n = 6$ restent en suspens.

Graphes de trois maisons et trois services

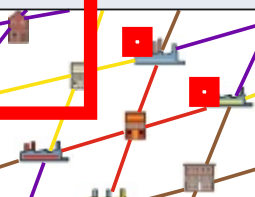
Le graphe reliant trois maisons aux trois services (gaz, électricité, eau), qui est la base du problème de Sam Loyd, a une forme plus générale : n nœuds sont reliés à m autres

Les trois maisons et les trois services

L'alimentation de trois maisons en eau, gaz et électricité est un problème mathématique dont l'origine, mal connue, est sans doute antérieure au XX^e siècle. Il n'a pas de solution sans croisement, car $K_{3,3}$ n'est pas planaire. En revanche, quelques astuces permettent de concevoir des pseudo-solutions. Trouvez pourquoi la figure ci-dessus, tirée de archimedes-lab.org/How_to_SolveWater_gas.html n'est pas une vraie solution.



Quand, à la place d'un plan, on considère un tore (qu'on obtient en recollant deux à deux les côtés opposés d'un carré), alors on peut résoudre le problème de dessiner sans croisement $K_{3,3}$ possède une solution, mais c'est aussi le cas pour $K_{4,4}$.



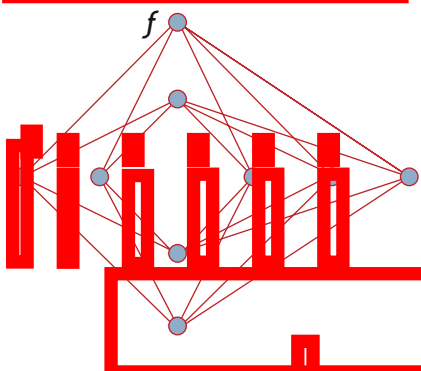
nœuds de toutes les façons possibles (il y en a nm). On note $K_{n,m}$ ce graphe et, bien sûr, on aimerait connaître le nombre minimum de croisements de $K_{n,m}$. C'est à ce graphe et au calcul de $cr(K_{n,m})$ que le mathématicien hongrois Paul Turán s'intéressa dans son camp de travail en 1944.

Voici quelques valeurs de $cr(K_{n,m})$ en fonction de n et de m , comme aujourd'hui :

$\begin{smallmatrix} n \\ m \end{smallmatrix}$	3	4	5	6	7
3	3	2	4	6	9
4	2	4	8	12	16
5	4	8	16	24	36
6		12	24	36	54

En 1952, une solution générale au problème que Turán avait fait connaître autour de lui fut proposée par Kazimierz Urbanik et Kazimierz Zarankiewicz. Ils prétendaient prouver que $cr(K_{n,m})$ est égal à $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor \lfloor \frac{n-1}{2} \rfloor \lfloor \frac{m}{2} \rfloor \lfloor \frac{m-1}{2} \rfloor$. Treize ans après, on s'aperçut que le résultat était faux. Des preuves initiales, seule reste l'inégalité selon laquelle $cr(K_{n,m})$ est inférieur ou égal à l'expression ci-dessus. Si nul n'a réussi à prouver que l'égalité est vraie, ni aujourd'hui aucun contre-exemple n'en a été proposé, et on a donc... une conjecture de plus.

La démonstration de l'inégalité est pas très difficile, car elle consiste à disposer le graphe en plaçant sur une ligne horizontale les n premiers nœuds, et sur une ligne verticale les m autres nœuds, de façon à équilibrer le maximum de croisements : les haute et basses et les nœuds droite et gauche. La figure ci-dessous est un exemple pour $K_{4,5}$:



Pour illustrer à quel point ces problèmes sont difficiles et les conjectures incertaines, mentionnons encore le cas du graphe Q_n

de l'hypercube à n dimensions. En 1973, R. Guy et Paul Erdős proposèrent la formule : $cr(Q_n) = \frac{n}{2} \times 4^n / 32 - 2^{n-2} \lfloor (n^2 + 1)/2 \rfloor$. Pendant plus de 40 ans, elle a semblé correcte. Pourtant, Yuansheng Yang, Guojin Wang, Haoli Wang et Yan Zhou, de l'Université de Dalian en Chine, trouvèrent en 2012 un contre-exemple pour $n = 7$ et toutes les valeurs supérieures. La conjecture est donc archifausse !

Imposer aux arcs d'être des segments de droite, nous l'avons dit, conduit à un problème dur, celui du calcul de $cr(G)$. Il se trouve qu'il n'est guère plus facile, car le nombre de dessins différents à envisager est plus petit. Dans le cas du Q_n , les valeurs calculées et vérifiées vont jusqu'à $n = 27$ et on connaît en plus la valeur pour $n = 30$.

Peu d'espoir de pouvoir aller loin

En fait, les difficultés rencontrées sont peu étonnantes, car on sait depuis longtemps que le problème du calcul de $cr(G)$ est un problème de la classe NP-difficile. Cela signifie que si l'on savait le résoudre efficacement, alors tous les problèmes sont résolubles en une grande famille de problèmes combinatoires difficiles, ce qui est plus qu'improbable. Cela n'empêche pas des progrès concrets en matière d'algorithmes.

On sait maintenant produire des dessins utiles en pratique pour des graphes de circuits comportant plusieurs centaines de nœuds. L'une des méthodes utilisées est la « planarisation » : on extrait du graphe un graphe planaire aussi grand que possible en ne retenant que certains arcs, et on ajoute ensuite avec précaution les arcs qui manquent en tentant de minimiser le nombre de croisements créés.

L'énigme du croisement des arcs d'un graphe montre que des thèmes de recherche que tout le monde peut comprendre concentrent parfois en eux toutes les difficultés possibles, et prouve une fois de plus que le monde mathématique même là où on s'y attend le moins, comporte des obstacles surprenants... et peut-être insurmontables. ■

L'AUTEUR



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille.

et chercheur au Laboratoire

d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

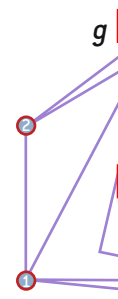
C. Buchheide et al., *Crossings and planarization of graphs*, in *Graph Drawing and Visualization* (éd. R. Tamassia), Chapman & Hall/CRC, 2013.

Y. Yang et al., *The Erdős and Guy conjecture on the crossing number of hypercubes*, 2012 : <http://arxiv.org/abs/1201.4700>

L. Beinke et R. Wilson, *The early history of the crossing number problem*, *The Mathematical Intelligencer*, vol. 32(2), pp. 41-47, 2010.

P. Erdős et R. Guy, *The crossing number problem*, *American Mathematical Monthly*, vol. 80, pp. 52-58, 1973.

K. Zarankiewicz, *On a problem of P. Turán concerning graphs*, *Fundamenta Mathematicae*, vol. 41, pp. 137-145, 1954.



Solution de la question posée au début de l'article

SCIENCE & FICTION

Pour quelques pattes de plus...



1. LE TRIPÈDE, créature extraterrestre imaginée par Damon Knight en 1954, a un corps à symétrie radiale, avec trois jambes, trois bras et six yeux.

Les extraterrestres de science-fiction ayant une paire de pattes surnuméraires seraient plus stables mais ils auraient des difficultés à coordonner les mouvements de tous leurs membres.

Jean-Sébastien STEYER
et **Roland LEHOUCQ**

Face à l'étonnante diversité du vivant sur Terre, comment imaginer une espèce extraterrestre originale ? Une solution souvent adoptée consiste à prendre un vertébré à quatre pattes et à lui ajouter une paire de membres supplémentaires. Les exemples les plus récents sont les martiens humanoïdes à quatre bras de la planète Barsoom dans le film *John Carter* (Andrew Stanton, 2012) et la plupart de la faune du film *Avatar* (James Cameron, 2009) où les equidiis, les tanators et autres titanothères ont tous six pattes. Remarquons que ce procédé n'est pas nouveau : le centaure, hybride homme-cheval, le griffon, assemblage d'un aigle et d'un lion, et le cheval ailé (tel Pégase) sont présents dès l'Antiquité. À ceux-ci s'ajoutent les dragons, les démons et les dragons occidentaux, mais aussi quelques divinités hindoues. Les êtres à six membres, ou hexapodes, sont-ils plausibles ?

Sur Terre, la plupart des vertébrés ont soit deux nageoires (chez les « poissons »), soit deux membres (chez les tétrapodes). Même si la plupart des tétrapodes sont dotés de quatre membres, certains ont perdu leurs pattes : c'est le cas des mammifères aqua-

tiques (céacés, siréniens) qui ne conservent que deux membres transformés en rames à l'avant, ou encore des serpents et des apodes (groupe d'amphibiens peu connu) qui n'ont plus aucune patte. Si, sur Terre, aucun vertébré n'est hexapode, les « six pattes » existent pourtant : ils regroupent entre autres les insectes et les collemboles qui peuplent les sols. Avec plusieurs millions d'espèces, les hexapodes sont même les organismes les plus nombreux.

Pourquoi un vertébré terrestre ne peut-il être doté de trois paires de membres ? Parce que ses pattes sont issues de nageoires charnues de poissons osseux, transformées il y a plus de 370 millions d'années en membres munis de doigts, aussi nommés membres chirodiens. Nageoires charnues et membres chirodiens sont eux-mêmes issus des ceintures pectorale (formant l'épaulure) et pelvienne (formant le bassin), à raison de deux nageoires (ou deux membres) par ceinture. Un vertébré à six pattes comme ceux de science-fiction devrait donc posséder une troisième ceinture osseuse au niveau du tronc, c'est-à-dire un segment supplémentaire.

Cela nécessiterait, au cours de l'embryogenèse, une action différente des gènes architectes (les gènes *Hox*) intervenant dans la segmentation du tronc et l'apparition des ceintures. Or l'organisation de ces gènes est bien plus complexe chez les vertébrés que chez les arthropodes, où une segmentation multiple est pourtant possible, entraînant souvent la multiplication des paires de pattes. C'est le cas des crustacés (qui ont jusqu'à dix pattes), des arachnides (huit pattes), sans oublier les scolopendres et les mille-pattes.

La présence d'un ou plusieurs membres surnuméraires est pourtant possible chez les tétrapodes, mais elle relève d'une malformation nommée polymélie. Chez l'homme, cette grave anomalie touche environ un enfant sur un million. Mais, comme chez l'ischopage (un fœtus « absorbant » partiellement son jumeau pendant son développement in utero), le ou les membres surnuméraires, souvent hypertrophiés ou déformés, ne sont pas des membres fonctionnels. Il faudrait des mutations

génétiques considérables pour obtenir un tétrapode à trois ceintures et six membres. De surcroît, une hexapodie fonctionnelle chez un vertébré nécessiterait des changements notables des systèmes musculaire et nerveux pour coordonner ces membres surnuméraires : comment un cheval hexapode se comporterait-il au galop ?

Les robots à trois pieds

La question de la coordination de six membres est d'ailleurs d'une grande importance pour les roboticiens qui cherchent à réaliser des robots mobiles hexapodes. Chez les cyborgs humanoïdes, le déplacement reste classique : dans *Star Wars*, le général Greivous, féroce ennemi des Jedis, se



2. UN THARK, MARTIEN à six membres du film John Carter. Il est doté de deux paires de bras et d'une paire de jambes, ce qui n'est pas la configuration la plus stable, laquelle est celle du trépied.

déplacer sur ses deux jambes, mais dispose de deux paires de bras robotiques armés de sabres laser.

Dans le domaine des transports, il y a beaucoup de roues, mais peu de pattes. En roulant sans glisser, la roue consomme peu d'énergie. Si les pattes sont moins économes, elles présentent néanmoins l'avantage de

s'adapter à de nombreux types de terrains. Les robots qui ont six pattes, plutôt que deux ou quatre, sont plus stables durant les déplacements : trois des pattes préparent le pas suivant, tandis que les trois autres stabilisent le robot. Trois pieds permettent d'être stable sur n'importe quel support, aussi irrégulier soit-il. Un tabouret à trois pieds est bien plus stable qu'une chaise à quatre pieds. Damon Knight, critique et auteur de science-fiction, avait bien compris : dans *Règle d'or*, une nouvelle publiée en 1954, il crée les « tripèdes », ingénieux extraterrestres hexapodes à symétrie d'ordre trois possédant trois pieds, trois bras et six yeux (voir la figure 1). Notons également que les envahisseurs de *La Guerre des mondes* (H.G. Wells, 1898) les « tripodes » se déplacent sur trois pattes, comme les Raméens si l'on en croit les héros du roman *Rendez-vous avec Rama* d'Arthur Clarke (1972).

Mais revenons aux robots : le biomimétisme est utile pour optimiser leur locomotion. Les insectes sont source d'inspiration, et l'étude de leur comportement et de leur système nerveux apporte de précieuses informations. Ainsi, la marche des insectes est gérée par deux types de contrôle nerveux : le premier commande les mouvements de chacune des pattes, tandis que le second contrôle les différentes allures par le biais des interactions des pattes voisines, les six pattes étant connectées en parallèle.

Les robots hexapodes ont d'ores et déjà montré qu'ils peuvent accomplir des tâches impossibles pour les véhicules équipés de roues. Pourtant les rovers martiens de la NASA ne sont pas encore équipés de pattes. *Curiosity* est doté de six roues motrices dont quatre sont orientables. La suspension de ce rover et la taille de ces roues lui permettent de franchir des obstacles de 10 centimètres de hauteur ou de profondeur. Mais sa vitesse maximale n'est que de quatre centimètres par seconde.

Des robots humanoïdes hexapodes rencontreront-ils un jour les martiens verts de Barsoom ?

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. L. LEBLANC est astrophysicien au CNRS, à Saclay.

ART & SCIENCE

Origami : de la grue aux structures de l'Univers

L'art japonais du pliage de papier entretient des liens étroits avec les mathématiques, mais aussi avec l'exploration spatiale, les airbags et même la matière noire !

Loïc MANGIN

L'origami est un art ancestral japonais, celui du pliage du papier. Il serait né en Chine et aurait conquis le pays du Soleil levant au VI^e siècle grâce à des moines bouddhistes. Il fut d'abord réservé à des cérémonies religieuses, le prix du papier à cette époque interdisant son usage courant. Aujourd'hui, l'origami s'est démocratisé et les enfants japonais apprennent à confectionner très tôt l'une des plus célèbres figures, la grue. Cet animal symbolise la paix et une légende locale stipule que : « Quiconque plie 1 000 grues en papier verra son vœu exaucé. »

L'origami fut un art de la sculpture réservé aux élites, puis un jeu d'enfants, et est devenu un sujet d'études pour... mathématiciens ! Le point de départ de ce dialogue fructueux entre les deux disciplines fut le langage créé par Kiriko Yoshizawa (1911-2005) pour coder les pliages en creux, en crête... à l'aide de points, de traits et de flèches. Précisons que Yoshizawa a conçu plus de 50 000 nouveaux modèles d'origami et qu'il fut invité à exposer ses œuvres au Carrousel du Louvre en 1998. Dès lors, on disposait

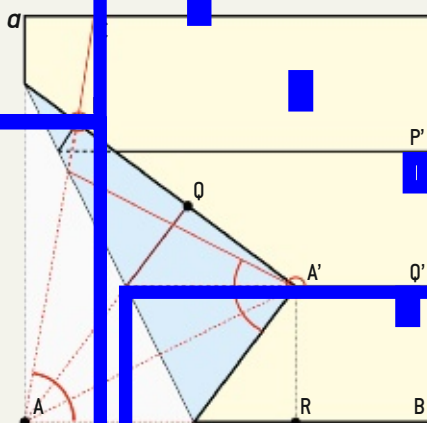
d'un moyen simple pour transmettre des figures. On pouvait également appliquer des principes mathématiques à l'art du pliage pour en découvrir les lois sous-jacentes. Avant de détailler quelques-unes et de voir comment les mathématiques aident à concevoir des figures complexes (voir les

figures en page ci-contre), rappelons que les méthodes de l'origami viennent à bout de trois problèmes géométriques célèbres impossibles à résoudre avec un compas et

une règle non graduée : la trisection d'un angle (voir la figure a), la quadrature du cercle et le doublement d'un cube.

L'origami est fondé sur un schéma de pliage (la figure b est celui d'une grue) qui doit obéir à quatre lois : la 2-colorabilité, c'est-à-dire que l'on peut colorier avec deux couleurs toutes les zones sans que deux régions adjacentes aient la même ; à chaque sommet, la différence entre les nombres de crêtes (en noir sur la figure b) et les creux (en marron) est égale à ± 2 ; la somme des angles pris alternativement ($1+3+5$ ou $2+4+6$ sur la figure b) autour d'un sommet est égale à 180 degrés ; enfin, quelle que soit la façon dont s'emmêlent les différentes parties de la feuille, aucune d'elles ne peut traverser un pli.

Armés de ces quatre lois, abordons un problème pratique : à partir d'une feuille carrée, par exemple un cerf-volant (le coléoptère de la figure c), comment plier une feuille carrée pour en obtenir une représentation (la figure e) ?



LA MÉTHODE DE HISASHI ABE pour la trisection de l'angle CAB. Avant de plier les feuilles, les droites AP et BQ sont parallèles à AB , Q et Q' étant les milieux de AP et de BP . Quand le point P est rabattu sur la droite AC et le point A sur QQ' en A' , l'angle $A'AB$ est égal au tiers de CAB .

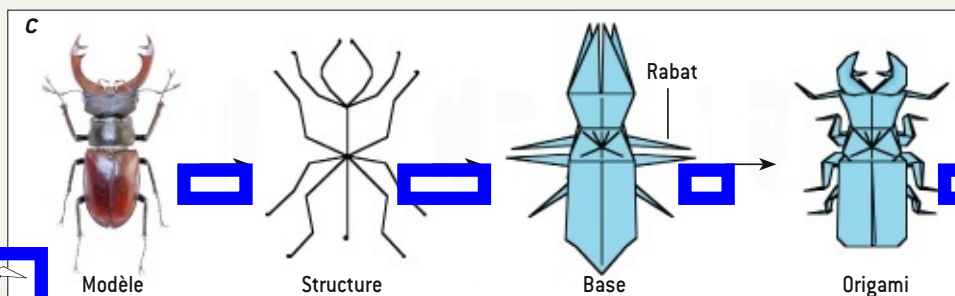
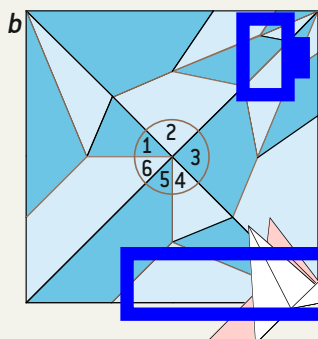
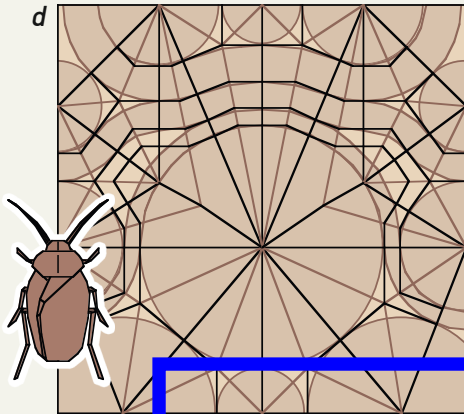


Photo : © Shutterstock - Gk / yvskohal

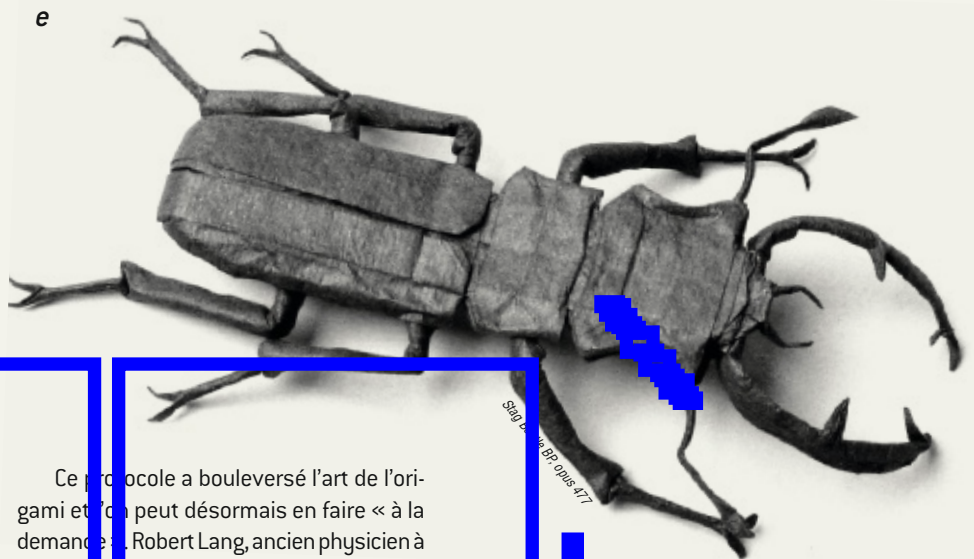


Dans les années 1990, les origamistes ont mis au jour quelques principes qui ont conduit à l'élaboration d'une sorte de mode d'emploi.

La première étape consiste à dessiner une structure en forme d'arbre dont les branches correspondent aux diverses parties du modèle, telles les pattes et les mandibules. Cette structure constitue un guide pour la construction de la base de l'origami, que l'on complexifie ensuite pour donner du réalisme au pliage (voir la figure c).

Le passage de la structure à la base de l'origami est l'étape la plus complexe. À chaque branche correspond un rabat du papier. Un tel rabat est obtenu, par exemple, à partir d'un carré que l'on plie en deux selon la diagonale, puis encore jusqu'à obtenir une « pointe » étroite et effilée qui sera une patte, un bras, une aile... Quand on déplie le papier, on constate que la partie utilisée pour le rabat est approximativement un quart de cercle situé à un coin du carré. On peut imaginer d'autres types de rabats construits à partir d'un demi-cercle ou d'un cercle entier au milieu du papier. Au final, une structure arborescente d'un origami correspond donc à une série de zones circulaires, entières ou non, disposées sur le papier.

Le problème devient celui du remplissage d'une surface avec des cercles, un problème qui a été beaucoup étudié par les mathématiciens. De leurs travaux ont émergé quelques règles grâce auxquelles on complète le pavage de cercles afin d'obtenir le schéma de plis de la base (voir la figure d). Ainsi, l'une des règles stipule que chaque centre de cercles est un sommet

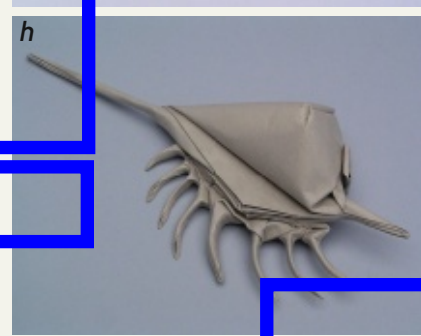
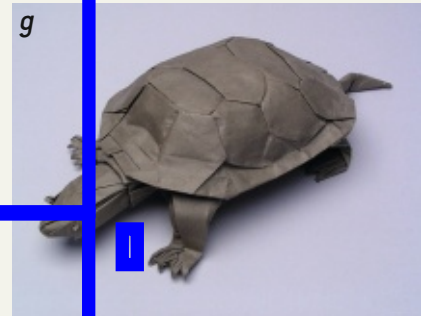


Ce protocole a bouleversé l'art de l'origami et l'on peut désormais en faire « à la demande ». Robert Lang, ancien physicien à la NASA et aujourd'hui origamiste professionnel, a conçu un logiciel nommé *TreeMaker* téléchargeable sur Internet, qui calcule le schéma de pliage à partir de n'importe quelle structure en arbre.

Les méthodes et les principes de l'origami ne sont pas cantonnés aux sphères artistique et mathématiques ; ils ont aussi leur place dans le monde de la technologie où les applications sont nombreuses et variées. Ainsi, en 2002, R. Lang a été sollicité par le Laboratoire *Lawrence Livermore* afin de concevoir pour un télescope spatial, une lentille de 100 mètres de diamètre qui pourrait tenir dans le cylindre de trois mètres de diamètre du lanceur... Un prototype de cinq mètres de diamètre a d'ores et déjà confirmé la faisabilité du projet. Autres exemples : un stent (un dispositif qui maintient ouverte l'artère où il est inséré) a été conçu sur le modèle des « bombes à eau » ; un airbag peut être déplié dans son réceptacle grâce aux méthodes de l'origami.

Plus récemment, en octobre 2012, Mark Neyrinck, de l'Université Johns Hopkins, et Sergei Scharadin, de l'Université du Kansas, ont montré que l'on pouvait comparer l'agencement des grandes structures cosmiques aux plis d'une figure d'origami : cet art du papier aiderait ainsi à mieux comprendre la répartition de la matière noire dans l'univers !

Le logiciel *TreeMaker* conçu par Robert Lang est téléchargeable gratuitement à l'adresse : <http://tinyurl.com/lang-treemaker>



IDÉES DE PHYSIQUE

Des frottements classés X

Mettant à profit l'électricité produite par le frottement, de petits émetteurs portables de rayons X seront bientôt disponibles.

Jean-Michel COURTY et Edouard KIERLIK

En 2008, des physiciens américains ont créé la sensation en montrant qu'un rouleau de ruban adhésif déroulé sous vide émet des rayons X au niveau de la zone de décollement. En travaillant sur ce résultat *a priori* anecdotique, ces chercheurs ont mis au point des sources de rayons X qui se révèlent utilisables en pratique : ne nécessitant pas de générateur de haute tension comme les sources classiques, elles ont l'avantage d'être aussi compactes qu'un téléphone mobile. La combinaison d'un simple rouleau de bande adhésive à des rayons X ?

pour les radiographies médicales ou pour les contrôles de sécurité des bagages.

Comment produire des rayons X ? Il y a émission d'ondes électromagnétiques dès que des charges électriques sont accélérées ou freinées. Pour que soient émis des rayons de petite longueur d'onde, la vitesse des charges doit varier très rapidement. C'est le cas d'électrons très énergétiques qui sont freinés ou stoppés par de la matière : ils émettent un rayonnement caractéristique (nommé *Bremsstrahlung* ou rayonnement de freinage) à très large spectre, auquel peut s'ajouter le rayonnement dû à la désexcitation des atomes de la cible. C'est le

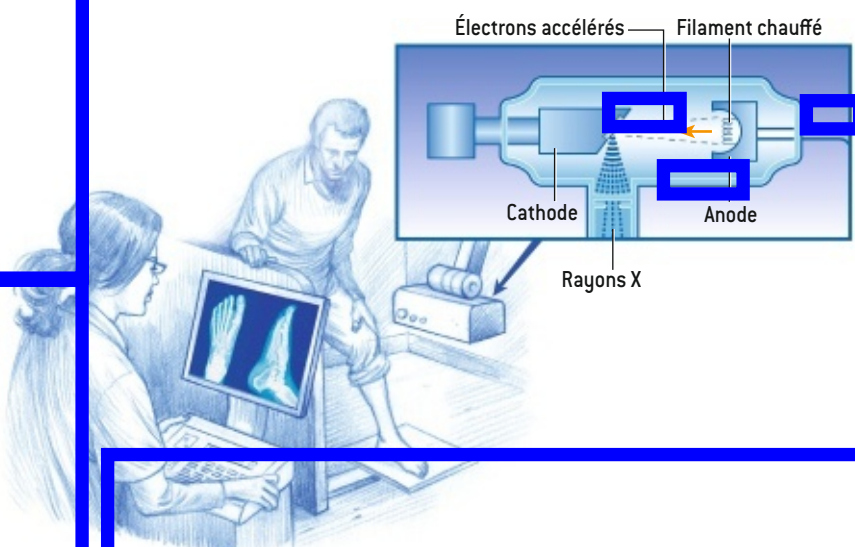
principe du « tube de Coolidge », inventé il y a 100 ans et toujours largement utilisé (voir la figure 1).

Dans ce dispositif, des électrons sont émis en grand nombre par un filament de tungstène chauffé par un courant électrique. Ils sont alors accélérés par une différence de potentiel électrique : pour qu'il y ait émission de rayons X, les électrons doivent acquérir une énergie au moins équivalente à celle des photons X, d'où la nécessité d'une haute tension (quelques dizaines de kilovolts). Par ailleurs, pour que les électrons ne soient pas ralentis durant leur (lente) accélération, le vide

Des rayons émis par des électrons stoppés net

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde est comprise entre un centième de nanomètre et dix nanomètres (inférieure à celle des ultraviolets). Cela correspond à des photons (de lumière non visible) d'énergie comprise entre 2×10^{-17} et 2×10^{-14} joule soit, dans des unités plus adaptées, entre 100 et 10^5 électronvolts.

Les plus énergétiques de ces rayons (au-delà de dix kiloélectronvolts), qualifiés de X durs, peuvent traverser de grandes épaisseurs de matière, comme celle d'un corps humain ou d'un bagage. En jouant sur les différences de pouvoir d'absorption des atomes – par exemple entre ceux des tissus mous et ceux des os, on peut alors réaliser des images de la structure interne d'un objet. D'où l'utilisation des rayons X



1. LES SOURCES CLASSIQUES DE RAYONS X sont les « tubes de Coolidge ». Dans un tel dispositif, un filament métallique chauffé par un courant émet des électrons. Ces derniers sont accélérés par une haute tension électrique entre l'anode et la cathode, et viennent frapper une surface oblique de tungstène posée sur la cathode. Le freinage brutal des électrons entraîne l'émission d'un rayonnement électromagnétique dont une bonne partie est composée de rayons X.

régnant dans le tube doit être de grande qualité (un milliardième d'atmosphère). Les électrons atteignent alors une cible métallique, généralement du tungstène ou du molybdène, où leur freinage brutal engendre le rayonnement désiré. Un ensemble d'écrans permet alors de diriger les rayons X vers l'objet à étudier. À haute tension, vide poussé, tube fragile... la mise en œuvre du tube de Coolidge reste délicate.



Recourir à la triboélectricité

Depuis le tube de Coolidge, d'autres sources de rayons X ont vu le jour, notamment pour analyser la structure de la matière à l'échelle atomique : il s'agit des synchrotrons, accélérateurs de particules en anneau qui occupent tout un bâtiment. La voie n'était donc pas celle de la miniaturisation... jusqu'à ce qu'en 2008, Seth Putterman et ses collègues, à l'Université de Californie à Los Angeles, s'intéressent à la triboluminescence. Ce phénomène est associé à la triboélectricité, c'est-à-dire l'apparition d'électricité statique lorsque deux surfaces sont frottées ou séparées. Les tensions électriques produites suffisent parfois à provoquer, lors de la séparation des surfaces, de petites décharges électriques qui émettent de la lumière.

En 1939, l'Américain E. Newton Harvey, grand spécialiste de la bioluminescence, avait observé ce phénomène avec un simple ruban adhésif. Chacun peut reproduire l'expérience chez soi : lorsqu'on dévide rapidement le ruban, une lumière bleutée est émise à l'endroit du décollement (voir la figure 2). L'effet est nettement visible, mais, comme nous l'avons expérimenté en déroulant près de 25 mètres de ruban adhésif « Magic Tape » de la marque 3M, il faut une obscurité totale et attendre plusieurs minutes que les yeux se soient adaptés.

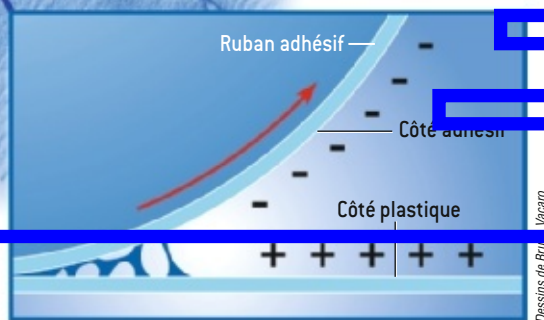
Harvey avait aussi remarqué qu'en séparant les lamelles de mica sous vide, les parois du verre de la cellule deviennent fluorescentes comme celles d'un tube à rayons X. Le physicien russe V. Karasev et ses collègues ont d'ailleurs confirmé

2. EN DÉROULANT DANS L'OBSCURITÉ complète un ruban adhésif, on peut distinguer une lumière bleutée émise de la zone de décollement. Si l'expérience est effectuée sous vide, on détecte l'émission de rayons X. Dans la région du décollement, des charges électriques se séparent. En résulte des champs électriques intenses, qui créent des microdécharges. Les électrons de ces décharges, accélérés par le champ électrique puis stoppés par la surface positive, émettent un rayonnement.

en 1956 cette émission de rayons X en étudiant le décollement d'un polymère d'une plaque de verre dans le vide.

Que se passe-t-il ? Tout d'abord, lorsque le ruban se décolle du rouleau, il se charge, comme on peut le vérifier en dévidant une vingtaine de centimètres de ruban : ce dernier est attiré par les surfaces les plus proches et attire de petits morceaux de papier, comme une règle de plastique frottée sur les cheveux. Ainsi, lors du décollement, on obtient une séparation de charges, négatives sur l'adhésif du ruban et positives sur le plastique du rouleau. Elles créent un champ électrique qui peut atteindre un million de volts par mètre lorsque les surfaces sont séparées de quelques dixièmes de millimètre.

Cependant, pour obtenir ce résultat, il importe de se placer dans un régime particulier de décollement, le « stick-slip » (collé-glissé). Dans ce régime, atteint à partir d'une certaine vitesse, le décollement n'est pas continu, mais se fait par saccades, d'où un bruit caractéristique. Les mécanismes qui créent des concentrations de charges, à l'origine des champs



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.upmc.fr>

BIBLIOGRAPHIE

J. R. Hird *et al.*, A triboelectric X-ray source, *Applied Physics Letters*, vol. 98, 133501, 2011.
C. G. Camarero *et al.*, Correlation between nanosecond X-ray flashes and stick-slip friction in cooling tape, *Nature*, vol. 455, 11, 2008, 1000-1003.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr



3. L'ÉMISSION DE RAYONS X

par effet triboélectrique va donner lieu à des émetteurs X compacts et portables, qui permettront de réaliser des radiographies ou des analyses chimiques sur le terrain.

électriques intenses, ne sont pas encore compris. Le spectre de rayonnement obtenu est très large, et va du visible jusqu'à des rayons X de 20 kiloélectronvolts et plus. Comme dans le tube de Coolidge, les rendements sont désastreux : un millionième seulement de la puissance mécanique fournie est récupérée sous forme de rayons X. Cette faible puissance lumineuse est tout de même suffisante pour radiographier une main !

Forts de ces résultats, les chercheurs américains ont poursuivi leurs travaux et créé une entreprise, *Tribogenics*, afin de développer une source utilisable reposant sur ce procédé. Leur nouvelle source, de la taille d'une clef USB, n'utilise plus un adhésif, mais un film de silicone qui est rapidement collé et décollé d'un substrat de résine époxy, à l'aide d'une cale piézo-

électrique. Un autre prototype en développement met en œuvre deux cylindres roulant l'un contre l'autre sous vide. Il suffit d'un petit moteur alimenté par une batterie pour faire tourner ces cylindres et produire des rayons X.

L'objectif est de disposer de sources de rayons X portables, de la taille d'un téléphone portable, plus petites, ne nécessitant pas de source de haute tension ni de mécanisme de refroidissement du métal chauffé par le faisceau intense d'électrons. On pourrait ainsi réaliser des radiographies sur le terrain (voir la figure 3), qu'il s'agisse de médecine ou de sécurité, avec un équipement complet tenant dans une mallette, ou encore d'y effectuer des analyses chimiques rapides et *in situ* à partir de la lumière caractéristique émise par les atomes après excitation par des rayons X.

universcience présente

les conférences

entrée libre

Les jeudis 17, 24, 31 janvier et 7, 14, 21 février à 19 h

théma **Les uns et les autres**

CYCLE "L'autre en nous"

Notre corps intègre des éléments étrangers : gènes provenant d'autres espèces, millions de bactéries en symbiose, fœtus chez la mère, organe d'un autre chez le greffé. Comment se redéfinit notre identité quand l'autre est en nous ?

Avec le soutien

SCIENCE SCIENCE VIE culture

programme complet sur www.universcience.fr

SCIENCE & GASTRONOMIE

Les odeurs blanches

Dans l'élaboration d'une odeur, évitons d'ajouter des composés nombreux en concentrations égales.

Hervé THOMAS

Les physiologistes de la vision savent que deux mélanges d'ondes lumineuses qui contiennent chacun des ensembles indépendants de nombreuses ondes produisent des « couleurs » indiscernables, dites blanches. Pour l'audition également, deux sons composés chacun de nombreuses ondes sortant de fréquences différentes sont indiscernables et donnent des « bruits blancs ». Ces sensations blanches naissent du mélange de stimulations indépendantes, qui couvrent tout le spectre perceptible, si elles sont d'intensités égales.

Le goût peut-il, de même, être blanc ? Les populations asiatiques auraient-elles eu raison de définir des saveurs « fades », parce qu'elles auraient été blanches ? Sans doute pas. D'abord, le goût est une sensation qui résulte de la stimulation de récepteurs de divers types (saveur, odeur, chaleur, consistance...). Ensuite la terminologie asiatique, comme d'ailleurs la terminologie européenne ancienne, mêlait des sensations d'ordres différents, confondant par exemple la saveur avec la perception tactile.

En revanche, Tali Weiss, Noam Sobel et leurs collègues à l'Institut Weizmann (Israël) ont cherché pour les odeurs à savoir s'il existerait des blancs olfactifs... et ils semblent les avoir identifiés (PNAS du 4 décembre 2012).

En physiologie olfactive, la mode scientifique, poussée par les avancées de la biologie moléculaire, est d'étudier les récepteurs et d'explorer la liaison d'un composé odorant particulier à un récepteur particulier. Toutefois les odeurs habituelles sont des mélanges de nombreux composés, et bien rares sont les

odeurs. Un seul composé est majoritaire (avec toutefois des exceptions, comme la vanille ou la cannelle). Pour les odeurs plus ordinaires, le nez humain ne parvient que très difficilement à discerner les composés odorants des mélanges, même si, par ailleurs, il distingue des mélanges parfois très proches : pensons aux bouquets des vins !

En acoustique, l'étude des mélanges d'ondes sonores a montré des phénomènes remarquables : à partir d'une onde sonore de fréquence unique, l'ajout d'ondes supplémentaires ne laisse discerner la somme des fréquences que tant que le nombre d'ondes ajoutées est inférieur à six environ ; au-delà, on perçoit un son unique. Et quand les ondes sonores sont aléatoirement réparties en fréquence, avec des intensités égales, alors un bruit blanc, sorte de bruit semblant d'eau, apparaît.

Et en matière d'odeur ? Pour leur travail, les physiologistes israéliens ont sélectionné 68 composés aux odeurs aussi différentes que possible, et ils les ont dilués individuellement jusqu'à ce que les dilutions semblent d'intensités olfactives analogues. Puis ils ont préparé des mélanges de ces diverses solutions odorantes et demandé à des volontaires de noter la ressemblance de paires de mélanges.

T. Weiss et ses collègues ont constaté que, quand on augmente le nombre de composés adjoints dans les mélanges, ces derniers se ressemblent de plus en plus, alors qu'ils n'ont pas la même composition. Avec environ 30 composés, la plupart des mélanges sentent la même chose.

Après avoir entraîné les sujets à reconnaître un mélange particulier de 30

composés, les expérimentateurs ont fait à nouveau sentir les mélanges; les sujets ont cru reconnaître l'odeur d'autres mélanges, quand ils étaient composés de beaucoup de composés odorants, alors qu'ils distinguaient bien des mélanges contenant moins de composés. Les physiologistes israéliens concluent qu'il existe donc bien un «blanc olfactif».

Au fait, quelle est son odeur ? Les descriptions données par des parfumeurs sont variables, sans doute parce que le blanc olfactif n'est pas une odeur particulière. En revanche, le blanc olfactif était noté plus plaisant — signe de comestibilité — que des mélanges où un composé odorant était prépondérant.

Cette dernière observation devrait guider les cuisiniers qui emploient des dilutions de composés odorants purs : pour faire des mélanges plaisants, mieux vaut utiliser moins de 30 composés et, surtout, apprendre à bien régler les concentrations des divers composés, en variant qu'ils soient tous à la même valeur. Ici, comme en peinture, comme en peinture, l'art culinaire doit apprendre à faire un premier plan et un arrière-plan. A quand la notion de perspective olfactive ? ■



Hervé THIS est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique

(A) *Anticlimacis*

Retrouvez les articles de H. This sur
www.pourlascience.fr

→ COSMOLOGIE

Le livre des univers

John Barrow

Dunod, 2012
[376 pages, 27,50 euros].

L'un des derniers de la déesse du multivers présente ici une histoire et une compilation des différents univers mis en avant par les chercheurs au fil des siècles. Son livre retrace l'histoire de tous les univers possibles, compatibles avec les fondements de la relativité générale et nos connaissances actuelles : ceux qui se dilatent et se contractent, ceux qui oscillent, les chaotiques, les univers à commencement et à fin, ou sans, l'univers de Schrödinger, celui, tournant, de Gödel, l'univers vallonné de Rosen, retourné sur lui-même, les univers statiques, éternels, aléatoires, probabilistes, autogénérés, à paysage quantiques, etc.

Donnons un exemple parmi les plus notables : les cosmologistes ont notamment imaginé un Univers en expansion, qui, dans les premiers stades de son histoire, passe par une phase d'expansion accélérée, nommée « inflation ». L'expansion atteinte à la faveur de ce phénomène ultrarapide conduit à un Univers visible seulement

en partie. Dès lors, on peut fort bien supputer que les parties invisibles de l'Univers peuvent être très différentes de celles qui ne le sont pas. L'inflation pourrait éventuellement s'autoreproduire, créant les conditions d'une infinité de univers, à l'origine d'une multitude d'autres univers, plus ou moins baroques : le multivers. Certains d'entre eux pourraient accueillir la vie, d'autres non.

Malgré le caractère abstrait et difficile de ces sujets, J. Barrow atteint une grande clarté, parvenant à s'élever du vertige que font naître les idées déroutantes et complexes qu'il expose ; des anecdotes historiques rendent son texte plaisant, dont l'intérêt est aussi de constituer une sorte de bilan des réussites et des échecs de la cosmologie du XX^e siècle. Instructif ! Ainsi ses très intéressantes descriptions de théories aujourd'hui récusées, tels l'univers en expansion de différentes façons à différents endroits, ou l'Univers dans Big Bang initial. Tout cela n'est pas sans suggérer que nombre des théories actuelles seront aussi abandonnées. Bientôt ?

→ Christophe Pichon

Institut d'astrophysique de Paris

→ ARCHÉOLOGIE

Alésia

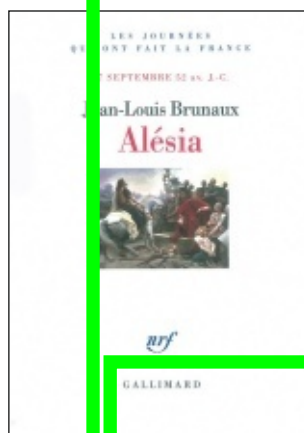
Jean-Louis Brunaux

Gallimard, 2012
[384 pages, 22,50 euros].

Lors de la guerre des Gaules, déjà depuis sept ans, et elle continua au moins un an après. Dès lors, pourquoi l'histoire de France commence-t-elle par une défaite ? Pourquoi les historiens ont-ils choisi ce fait haut en couleur, mais en aucune façon unique, pour faire commencer l'histoire

de notre pays ? Telle est la question abordée dans ce livre.

Rien n'illustre mieux le curieux choix des historiens que le célèbre tableau de Lionel-Noël Royer (1882-1926), où l'on voit Vercingétix, fier et orgueilleux, venir jeter ses armes aux pieds d'un Jules César inflexible. Pour spectaculaire que soit cette image, elle ne représente ni l'avènement d'un



« peuple » celui d'une « culture » (« nos ancêtres les Gaulois »), mais seulement la défaite de Gaulois, chevelus disciplinés, batailleurs face aux armées d'une Rome bien organisée, dotée d'institutions politiques, d'un droit, bref civilisée... La vraie histoire de notre pays débute-t-elle vraiment par l'entrée en civilisation d'un peuple ancestral sauvage ?

J.-L. Brunaux montre que non en étudiant au miroir de notre histoire comment Alésia est devenue la « défaite fondatrice » que nous connaissons. Il emploie pour cela toute l'expérience qu'il a acquise, notamment en tant que fouilleur du site gaulois majeur de Ribemont-sur-Ancre, mais aussi en tant que lecteur acharné des sources antiques. Il a ainsi retraduit et réinterprété les textes de César, et ceux de Crœsus Posidonios, dont

quelques bribes nous sont parvenues. Cela lui donne l'occasion de reprendre plusieurs points histo-

riographiques, tels les liens avérés entre Vercingétix et Jules César, le phénomène extraordinaire d'une fédération des peuples gaulois, mais aussi les trahis de certains d'entre eux, tels les Éduens ou encore les Arvernes.

C'est donc un grand maître des études gauloises qui, retraçant la façon dont Alésia a été vue depuis César jusqu'à nos jours, fait apparaître par quel processus cette défaite a pu être transformée au XIX^e siècle en un symbole d'unité nationale. Comme l'écrit J.-L. Brunaux, avec la fin de la guerre des Gaules, c'est « la Gaule des temps obscurs qui a sombré à nouveau dans la préhistoire. Cette Gaule, qui demeure tout entière à découvrir ».

→ Valérie Lécivain

Laboratoire d'anthropologie préhistorique, CNRS, France

→ GÉOGRAPHIE

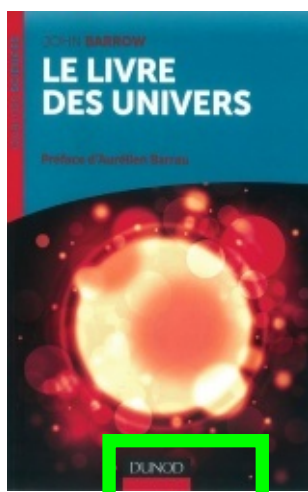
Nouveaux rapports à la nature dans les campagnes

F. Papy, N. Bouteiller et C. Bouteiller (dir.)

Éditions Quae
[192 pages, 26 euros].

Ces études de cas illustrent les enjeux de l'utilisation de l'espace rural. Des agronomes, des économistes, des sociologues, politologues, anthropologues et autres géographes y brosent un tableau assez complet des notions impliquées dans la gestion des terres rurales et des ressources naturelles. Les relations parfois conflictuelles, mais aussi constructives, qui se tissent dans le cours de cette gestion apparaissent.

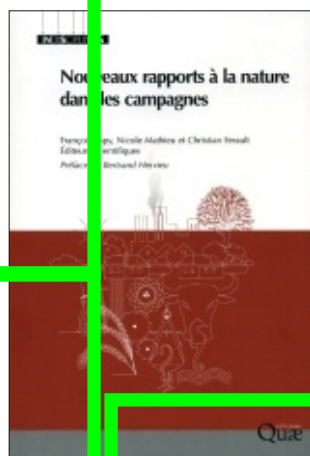
Autrefois considérées seulement comme des espaces de production agricole, les campagnes jouent aujourd'hui plusieurs rôles



sociaux. En plus d'être des producteurs de denrées alimentaires, les agriculteurs sont devenus des acteurs reconnus dans la gestion des paysages et l'accueil de publics locaux ou citadins. Ils font ainsi preuve d'initiative pour accompagner l'évolution des besoins ou demandes des populations s'investissant par exemple dans le commerce de produits locaux ou dans l'accueil de touristes.

Dans ce contexte, les auteurs mettent en évidence les évolutions encore nécessaires pour que villes et campagnes interagissent davantage encore. La gestion des flux des matières organiques, par exemple, apparaît simple quand il s'agit d'aller de la campagne vers la ville, mais elle est beaucoup plus complexe dans le sens inverse. Ni les institutions ni les populations n'ont conscience du cycle vital de la matière et du nécessaire retour à la terre d'une partie de ce qui en provient. Les études de cas présentées – telle cette démarche de quatre communes rurales allemandes et autrichiennes visant à produire des énergies renouvelables – montrent combien les projets collectifs menés par les populations rurales sont souvent couronnés de succès.

Les institutions jouant un rôle clef dans les rapports à la nature dans les campagnes, elles sont aussi largement évoquées à travers le livre. Si les politiques de l'Europe et de l'État ou des collectivités territoriales soutiennent par des aides fiscales ou financières les actions des agriculteurs, particulièrement celles favorables à la préservation des ressources naturelles ou l'aménagement d'un espace rural accueillant la question de la politique foncière, c'est un enjeu majeur pour ce début de XXI^e siècle. Le renchérissement du prix du sol dans les zones périurbaines est



tel que les propriétaires fonciers, le plus souvent des citadins héritiers de terre qu'ils ne cultivent pas, choisissent l'usage le plus rentable de celui du terrain à bâtir.

Forêt fière, longtemps gestionnaire d'un grand domaine forestier, j'ai été confrontée pendant ces années aux rôles multiples des forêts, et je sais combien la gestion combinée des fonctions de production, sociale et environnementale est complexe. Ce livre bienvenu met en valeur le travail réalisé par les agriculteurs d'aujourd'hui.

→ Régine Touffait

Officielle national des forêts, Paris

→ ÉPISTEMOLOGIE

Les jeux des erreurs scientifiques

Girolamo Ramunni

Le Cavalier Bleu, 2012
(208 pages, 18,50 euros).

L'erreur est partout, elle est dans la science comme ailleurs. Plutôt que de l'oublier ou de la mettre sous le tapis, c'est vers elle que se tourne l'historien des sciences Girolamo Ramunni pour offrir une petite réflexion historique sur l'activité scientifique. Des erreurs, l'auteur en présente différentes sortes. C'est

Galilée qui croit pouvoir prouver le mouvement de la Terre autour du Soleil en s'appuyant sur le phénomène des marées. C'est Newton qui s'inspire de l'alchimie pour établir sa loi de la gravitation. C'est Antoine van Leeuwenhoek qui voit dans sa découverte des spermatozoïdes une preuve que tout nouveau individu provient d'un animalcule contenu dans le sperme du mâle. Ce sont l'abbé Nollet et Benjamin Franklin qui s'opposent, à coup d'expériences, sur la nature de l'électricité sans que l'un ou l'autre n'arrive à l'emporter. C'est Lavoisier qui met un terme à la théorie phlogistique pour adopter celle calorifique, tout autant vouée à disparaître... C'est Max Planck, en 1900, qui invente un artifice mathématique revenant à quantifier la lumière tout en refusant toute réalité physique à cette première quantification pleine d'avenir. C'est, toujours au début du XX^e siècle, le physicien René Blondlot qui, avec ses rayons N, pense avoir découvert un nouveau type de particule avant que celle-ci ne soit finalement jugée introuvable, puisqu'imaginaire. Et ainsi de suite.

Que penser de toutes ces erreurs et des mille autres non mentionnées dans cet ouvrage ? Certains ont parfois été fécondes, au sens où elles ont permis de faire



Brèves

Comment l'homme devient fabrier

François Sigaut

CNRS éditions, 2012
(236 pages, 9,85 euros).

L'homme a fait l'outil, mais l'outil fait l'homme. L'auteur, récemment disparu, anthropologue des techniques à l'EHESS, livre sa réflexion sur le rôle de l'outil dans notre évolution, proposant d'abord de grandes catégories de techniques – les techniques à mains nues ou à mains outillées –, puis d'outils – les outils imitant la main ou originaux ; puis il discute de la notion de partage de l'attention entre fins et moyens qui caractérise l'emploi de l'outil par un homme et du rôle de partage de plaisir, qui peut jouer un rôle essentiel dans notre évolution, en particulier sociale.

Penser l'évolution

Hervé Le Guyader

Imprimerie nationale, 2012
(544 pages, 29,50 euros).

L'auteur présente une histoire enrichie de nombreuses citations de la façon dont les biologistes se sont libérés du fixisme au cours des deux derniers siècles, pour dégager progressivement la nature du génotype (la composition des gènes), ses relations avec le phénotype (l'ensemble des caractères) et l'environnement. Cette quête vient selon lui de culminer dans la mise en évidence précise d'une boucle autorégulatrice assurant la régulation de l'expression du génotype, l'épigénétique, qui jouerait en biologie le rôle historique de l'atome d'hydrogène en physique.

Monte Revincu

Franck Léandri et Christophe Gilabert

Errance, 2012
(136 pages, 27 euros).

Ce très beau petit livre présente le village néolithique de la Cima du Suarellu en Haute-Corse, puis les monuments mégalithiques voisins qui en sont contemporains. Ses textes clairs, le mélange habile de ses dessins d'illustration et de ses photographies d'archives en rendent la lecture facile et attrayante. Et ce qui ne gâche rien, cette présentation de la vie des paysans qui avaient investi le désert des Agriates il y a plus de 4 000 ans est accompagnée d'un reportage sur DVD de 52 minutes du réalisateur et préhistorien Marc Anéme sur les origines néolithiques de la Corse.

Brèves

Guyane océane

Daniel Guin
et Roger Le Guen

Éditions Roger Le Guen/IRD,
2012 (475 pages, 56 euros)



Porte d'accès à la forêt amazonienne, on oublie que la Guyane possède un domaine littoral d'une grande richesse. Ses côtes, parfois difficiles d'accès, hébergent une biodiversité importante et fragile. De magnifiques photographies illustrent les propos d'un collectif de chercheurs, qui présentent la faune et la flore guyanaise aux naturalistes amateurs et aux professionnels. Les différents chapitres expliquent l'écosystème fragile de milieux aussi variés que les rivières, les plages ou les mangroves et le rôle qu'y joue l'homme.

Introduction aux mystères

Misha Gromov

Fondation Calvié, 2012
(2012 pages, 17,50 euros).



« Nos cœurs se réjouissent de ce qui est beau, chaleureux, vivant, écrit l'auteur, et ces idées paraissent belles, chaleureuses, vivantes, comme de petits chics sous votre main. » Ces idées, exprimées par des morceaux vifs de leurs pensées, ce sont celles des grands hommes de sciences, que nous admirons, que nous aimons. Un petit ouvrage délicieux et vivant en effet, mais qui l'aurait été plus encore plus si certains des grands hommes de sciences anglais avaient été... des femmes. Évidemment, on pense à Germain, Emily Noether, Marie Curie... aussi ont pensé, et malgré quelle adversité!

Journal de bord (diary) du voyage du Beagle (1831-1836)

Charles Darwin

Éditions Honoré Champion,
2012 (832 pages, 29 euros).



Le voyage du *Beagle* autour du monde est ici narré au jour le jour par le jeune Charles Darwin, âgé de seulement 22 ans au départ. Sur un ton direct et spontané, celui-ci évoque la vie à bord du bateau, commente ses différentes rencontres lors des escales. Il confie aussi ses observations scientifiques en géologie et sur le ressemblance de certaines espèces animales qui le mènent à développer sa théorie de l'évolution. Ce témoignage direct permet au lecteur d'assister à un moment clef dans l'histoire des sciences.

avancer l'état des connaissances. « Les erreurs sont les portes de la découverte », écrivait d'ailleurs James Joyce. Rien que pour cette raison, G. Ramunni veut « mettre à l'honneur la capacité de se tromper et l'utilité de ne pas avoir peur de se tromper ».

Toutefois, là n'est pas à ses yeux le seul mérite de l'erreur. Cette dernière n'est pas seulement riche de promesses, elle est aussi une très instructive porte d'entrée pour l'histoire des sciences. G. Ramunni estime que se tourner vers les erreurs du passé permet de se défaire d'une idéalisation de l'entreprise scientifique encore trop présente de nos jours. Comme elle le montre dans de courts récits, l'analyse d'erreurs scientifiques permet de comprendre à quel point les savants sont ancrés dans une culture, une époque et parfois même un lieu. Ce qui est indéniablement une très bonne invitation à méditer sur nos éventuelles erreurs...

→ Thomas Lepeltier

Oxford

→ MATHÉMATIQUES

L'univers des mathématiciens

Bernard Zarca

Presses universitaires
de Rennes, 2012
(301 pages, 20 euros).

Un scientifique qui s'empare sur l'éthos des mathématiciens. Bon connaisseur du milieu, il s'est demandé comment caractériser les manières d'être et de penser ce domaine de ces penseurs, dont la science (si elle en est une) est la plus rigoureuse et la plus universelle de toutes. Au moyen d'un questionnaire envoyé par Internet aux mathématiciens et mathématiciennes de France, il

a donc interrogé, sur eux-mêmes, ces aventuriers de l'abstrait.

Qu'en a-t-il constaté ? Tout d'abord, la persistance de la séparation entre mathématiciens purs et mathématiciens appliqués, dont l'origine remonte au XIX^e siècle. En France, cette différence a structuré la communauté mathématique durant la première partie du XX^e siècle, et elle a vu son apogée avec le mathématicien imaginaire Nicolas Bourbaki (une association de mathématiciens qui a exercé une grande influence sur la formalisation et l'enseignement des mathématiques) avant de s'atténuer avec l'arrivée de Jacques-Louis Lions, successivement président de l'INRIA, du CNRS, de l'Union mathématique internationale et de l'Académie des sciences, qui a créé une école de mathématiques appliquées impliquée dans de nombreux domaines de la science. Pour autant, la statistique, considérée ailleurs comme une branche des mathématiques, reste marginalisée en France.

L'enquête de B. Zarca a aussi permis une analyse des méthodes essentielles de l'activité mathématique : l'intuition et la logique fondées soit sur les moyens de l'intelligence pure – considérés par les mathématiciens comme très nobles –, soit sur des moyens techniques tel l'ordinateur – jugés par les mathématiciens comme nettement moins nobles. Toutefois, les frontières entre l'abstrait et le concret ont aussi à s'estomper, telles celles entre mathématiciens purs et appliqués.

Autre aspect : à l'intérieur des mathématiques, et donc parmi les mathématiciens, subsistent des hiérarchies. Au sommet, on



trouve la théorie des nombres et la géométrie algébrique ; tout en bas, les applications des mathématiques. Ces hiérarchies s'expriment assez tôt dans la carrière d'un mathématicien : ainsi le passage par une École normale supérieure ou éventuellement une autre grande école, reste assez impératif pour atteindre les plus hauts sommets.

Qui dit hiérarchie dit aussi pouvoir et institutions, telles les commissions de spécialistes, de recrutement, voire les académies. Les mathématiciens affichent un certain détachement face au pouvoir, mais ne sont pas indifférents aux honneurs et aux distinctions, ce qui les place dans la société bien humaine dont ils prétendent s'abstraire.

Ce livre de sociologie bienvenu va donc intéresser, notamment parce qu'il démythifie un milieu très élitiste et donc plutôt fermé, mais qui, comme les autres, est constitué d'hommes et de femmes citoyens.

→ Gérard Huet

Paris 12

Retrouvez l'intégralité de votre magazine
et plus d'informations sur
www.pourlascience.fr

