

LES UNIVERS MULTIPLES : science ou spéculation gratuite ?

■ POUR LA SCIENCE

Février 2012 - n° 412

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Le temps universel Faut-il le redéfinir ?

L'ours des cavernes

Son histoire racontée
par la grotte Chauvet

Le théorème de la table de pique-nique

La conjecture des carrés
inscrits presque résolue

Une bactérie rusée

Les multiples feintes de *Listeria*
pour infecter l'organisme

M 02687 - 412 - F: 6,20 €



Allemagne : 9,30 € - Belgique : 7,20 € - Canada /S : 10,95 CAD - Grèce /S : 7,60 € - Guadeloupe/St Martin /S : 7,30 EUR - Guyane /S : 7,30 € - Italie : 7,20 € - Luxembourg : 7,20 € - Maroc : 60 MAD - Martinique /S : 7,30 € - Nlle Calédonie Wallis /S : 980 XPF - Polynésie Française /S : 980 XPF - Portugal : 7,20 € - Réunion /A : 9,30 € - Suisse : 12 CHF

OFFREZ LES CLÉS DE LA SCIENCE !

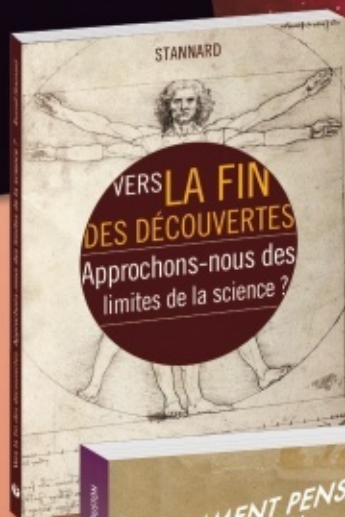


À LA DÉCOUVERTE DE L'UNIVERS

Les bases de l'astronomie et de l'astrophysique
Neil COMINS

« À la découverte de l'univers » propose une visite guidée, simple mais superbement illustrée, et très complète de l'univers depuis les recoins du système solaire jusqu'aux galaxies les plus lointaines.

568 pages - 49 € - Novembre 2011

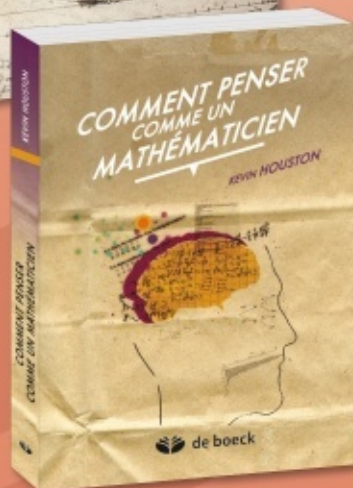


VERS LA FIN DES DÉCOUVERTES

Approchons-nous des limites de la science ?
Russell STANNARD

Une réflexion sur les progrès apportés par la science, avec ses limites, qui est censée éveiller un sens de profond respect face aux mystères de l'existence.

168 pages - 19 € - Août 2011



COMMENT PENSER COMME UN MATHÉMATICIEN

Comprendre, expliquer et étudier
Kevin HOUSTON

En chacun, il y a un mathématicien qui s'ignore. Ce livre vous aidera à révéler celui qui est en vous !

306 pages - 22 € - Juin 2011

POUR LA SCIENCE

www.pourlascience.fr

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

Groupe POUR LA SCIENCE

Directrice de la rédaction : Françoise Pétry

Pour la Science

Rédacteur en chef : Maurice Mashaal

Rédacteurs : François Savatier, Marie-Neige Cordonnier,
Philippe Ribeau-Gésippe, 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 Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Ifédayo Fadoju

Marketing : Élise Abib

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This

Ont également participé à ce numéro :
Jean-Pol Beauthier, Serge Berthier, Domitille Boudard,
Bettina Debù, Rafael Garcia, Guillaume Lecointre,
Anne Masè, Liliane Moens, Christophe Pichon,
Daniel Tacquenet, Richard Taillat.

PUBLICITÉ France

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

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

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

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

Adresse postale :

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

Commande de livres ou de magazines :

0805 655 255 (numéro vert)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tel : 04 88 15 12 41

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

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

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

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

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

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

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

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



ÉDITO

de Françoise Pétry directrice de la rédaction

Spéculations

Le philosophe spéculé. Le financier spéculé. Dans la conjoncture actuelle, le terme a une connotation particulièrement négative pour le second. Mais c'est aussi le cas pour le philosophe que l'on imagine s'adonner à un exercice de style ou à une réflexion gratuite, une « dispute » rhétorique sans réel enjeu. Que dire du scientifique qui spéculé ? En science, une spéculation serait une hypothèse difficile à tester.

Et si elle n'était pas testable ? C'est bien la difficulté dans certains domaines, notamment en cosmologie, où seules les observations permettent de confirmer les théories proposées. Que dire de l'hypothèse de l'univers multiple ? Pour certains, le multivers représente un « pari raisonnable », pour d'autres non, même s'ils concèdent que le concept aide à réfléchir à la nature de l'Univers et à la méthode scientifique (voir *Le multivers existe-t-il ?*, page 50). L'hypothèse et la spéculation sont donc utiles en science.

Le terme a une connotation négative.

L'hypothèse – et, avec elle, la méthode hypothético-déductive – est le moteur de la démarche scientifique. Par exemple, les neuroscientifiques étaient persuadés que les cellules de la vision étaient aussi celles qui commandent la régulation du sommeil et de l'éveil. Mais ils ont observé que des souris aveugles ont, comme toutes les autres, des activités qui respectent l'alternance du jour et de la nuit. Ils en ont déduit que d'autres cellules de la rétine sont impliquées dans le rythme circadien (voir *Les cellules oubliées de l'œil*, page 70).

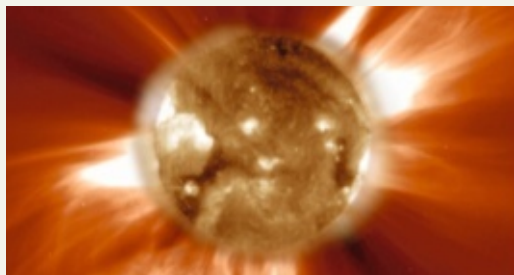
De même, la bactérie *Listeria* infecte l'organisme comme beaucoup d'autres. Mais elle a des conséquences spécifiques et graves chez certaines personnes. En tirant les fils de l'écheveau des gènes et des protéines de la bactérie, les biologistes ont mis en évidence une panoplie originale de stratégies visant à déjouer le système de défense de l'organisme (voir *Les multiples stratégies de Listeria*, page 42).

Selon le philosophe Henri Bergson (1859-1941) : « La spéculation est un luxe, tandis que l'action est une nécessité » (*L'évolution créatrice*, 1907). Le philosophe réfléchit – serait-ce le luxe envisagé par Bergson ? –, le financier agit, achetant et vendant des valeurs – mais est-ce vraiment une nécessité ? – et le scientifique réfléchit et agit, luxe et nécessité !

1 ÉDITO

4 BLOC-NOTES
Didier Nordon

Actualités

6 La Lune soufflée
par des bourrasques
solaires9 La marche a débuté
sous l'eau10 Molécule plus complexe,
bouquet plus riche11 Le bouton d'or : briller
pour attirer les abeilles
... et bien d'autres sujets.

13 ON EN REPARLE

Opinions

14 POINT DE VUE
Conférence de Durban :
un non-événement ?
Christian de Perthuis15 DÉVELOPPEMENT DURABLE
Le défi de la réintroduction
de végétaux disparus
Stéphane Buord18 VRAI OU FAUX
Les fruits et légumes
surgelés sont-ils sains ?
N. Frisicale et J.-M. Lecerf

19 COURRIER DES LECTEURS

Deux encarts publicitaires « Dialog marketing » et « Ellipses » sont posés en 4^e de couverture de l'édition abonnés France.
Ce numéro comporte également sur la totalité du tirage deux encarts d'abonnement Pour la Science brochés, une offre d'abonnement Pour la Science en p. 24 et une sélection de livres Pour la Science/Belin/Le Pommier en p. 76.
En couverture : © Shutterstock/Flaxy

À LA UNE

20 MÉTROLOGIE

Temps universel :
faut-il supprimer
les secondes intercalaires ?

D. Finkleman, S. Allen, J. Seago, R. Seaman et K. Seidelmann

Le temps indiqué par les horloges s'est toujours calé d'une façon ou d'une autre sur les mouvements de la Terre et du Soleil. Mais cette référence astronomique pourrait être abandonnée.



28 PALÉONTOLOGIE

L'ours spéléologue

Jean-Marc Elalouf et Valérie Féruglio

Véritable musée de l'ours des cavernes, la grotte Chauvet nous permet de nous représenter cette espèce disparue et d'étudier son mode de vie ainsi que son génome.



34 PHYSIQUE

Les isolants de Mott,
des conducteurs bloqués

Antonio Tejada et Arantzazu Mascarague

Certains conducteurs électriques deviennent isolants quand on modifie la pression ou la température. Les physiciens tentent de mieux comprendre ce phénomène en l'étudiant sur des matériaux bidimensionnels.

42 BIOLOGIE CELLULAIRE

Les multiples stratégies
de *Listeria*

Alice Lebreton, Hélène Bierne et Pascale Cossart

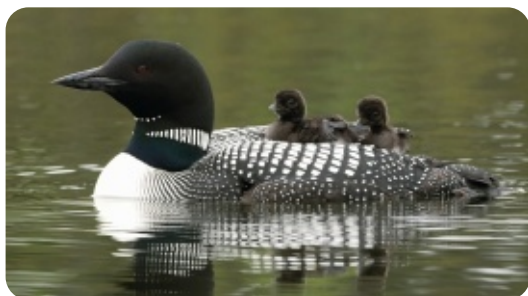
Listeria, la « bactérie des frigos », responsable de la listériose, infecte les cellules en détournant leurs fonctions et en déjouant le système immunitaire.

50 COSMOLOGIE**Le multivers existe-t-il ?***George Ellis*

L'idée d'univers parallèles radicalement différents du nôtre est séduisante, mais excessivement spéculative.

58 ÉTHOLOGIE**Les cris des plongeurs, des messages codés***W. Piper, J. Mager et C. Walcott*

Des oiseaux du grand Nord américain, les plongeurs huard, ont un cri remarquable. Il leur sert à signaler à leurs rivaux qu'ils sont prêts à défendre farouchement leur territoire.

**66 MÉDECINE LÉGALE****Un bras dans la glace***Colleen Fitzpatrick*

De nouvelles techniques d'analyse d'empreintes digitales et d'ADN ont permis d'identifier le propriétaire d'un bras retrouvé 60 ans après une catastrophe aérienne.

**70 NEUROSCIENCES****Les cellules oubliées de l'œil***Ignacio Provencio*

L'alternance de l'éveil et du sommeil est contrôlée par des cellules sensibles à la lumière situées dans l'œil. Leur étude pourrait conduire à de nouveaux traitements de la dépression saisonnière et autres troubles de l'humeur liés à un manque de lumière.

Regards**78****HISTOIRE DES SCIENCES****L'affaire Hubble-Lemaître résolue***Dominique Lambert*

Dans la traduction en anglais d'un article de l'astronome Georges Lemaître, un paragraphe a disparu, où il donne les prémisses de la constante de... Hubble. Omission de plein gré ou imposée ?

82**LOGIQUE & CALCUL****La conjecture du carré inscrit***Jean-Paul Delahaye*

Placer sur une courbe fermée quatre points formant les coins d'un carré est presque toujours possible. C'est bien, mais comment se débarrasser du « presque » ?

88**ART & SCIENCE****Vermeer, la carte et le castor***Loïc Mangin***90****IDÉES DE PHYSIQUE****Lire un disque avec des toupies électroniques***Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik***93****SCIENCE & GASTRONOMIE****Des succulences à foison***Hervé This***94****À LIRE**

Rendez-vous sur **SCIENCE**.fr

Plus d'informations

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

Les services en ligne

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

www.pourlascience.fr

→ MISANTHROPOPHAGE

Un misanthrope anthropophage, voilà qui est étonnant – je veux dire, étonnant quant à la formation des mots. Misanthrope : le substantif *anthropos*, homme, suit le verbe *misein*, haïr, dont il est complément. Anthropophage : ce même substantif précède le verbe *phagein*, manger, dont il est complément. Dans quel ordre le grec mettait-il donc le verbe et son complément ?

Un philanthrope anthropologue n'est pas moins étonnant – je parle toujours de formation des mots. Philanthrope se compose de deux substantifs : le déterminant *anthropos* suit le déterminé *philos*, ami. Anthropologue se compose aussi de deux substantifs, mais le déterminant *anthropos* précède le déterminé *logos*, discours. Dans quel ordre le grec mettait-il donc le déterminant et le déterminé ?

Ces questions sont sans doute faciles. Mais je n'ai d'autres connaissances du grec ancien que celles devinées en observant les mots français qui en dérivent. Visiblement, ce n'est pas suffisant.

admettre, par exemple, que le triangle, dans sa pureté géométrique, existe sans hommes pour l'imaginer : je doute que les dinosaures aient élaboré l'idée de côté sans épaisseur et de sommet sans dimension ; je doute que les bactéries qui, peut-être, se perpétueront après nous garderont la mémoire de nos conceptions géométriques.

Tous les mathématiciens ne l'entendent pas ainsi. « Un théorème correct et une démonstration correcte survivront à leur auteur, à l'espèce humaine et même à l'univers physique. [...] [Une affirmation mathématique] est vraie indépendamment de toute élaboration humaine ou même matérielle, et elle sera sûrement vraie même lorsque l'Univers dans lequel nous l'avons observée aura cessé d'exister », déclare le mathématicien Don Zagier (catalogue de l'exposition *Mathématiques – Un dépaysement soudain*). Qu'on me permette de préférer un réalisme sommaire. Les idées ne sont pas éternelles, parce qu'elles n'ont d'existence nulle part ailleurs que dans des cerveaux. Se demander si les éventuelles abstractions mathématiques forgées par des extraterrestres ressemblent aux nôtres peut être stimulant, quoique fort spéculatif. Mais imaginer des vérités errant toutes seules dans le vide laissé par l'Univers disparu, n'est-ce pas pousser l'idéalisme jusqu'au saugrenu ?

fin fond des abysses océaniques. Encore faut-il que, plus malines que nous, ces espèces animales aient réussi à nous observer, nous, les hommes, alors même que nous ne les avons pas découvertes, donc pas bousculées.

Pas de neutralité à attendre non plus de la part des martiens, sélénites et autres extraterrestres. Ils interviennent trop souvent dans nos romans de science-fiction et nos extrapolations philosophiques pour ne pas être tantôt flattés, tantôt fâchés, par les attitudes et aptitudes que nous n'hésitons pas à leur prêter. Eux aussi ont tissé avec nous des relations qui les empêchent d'être objectifs à notre égard.

Alors ? Les hommes sont-ils bons ? Sont-ils mauvais ? J'ai ma petite idée là-dessus, mais la déontologie m'interdit d'en faire état publiquement, puisque je suis juge et partie.



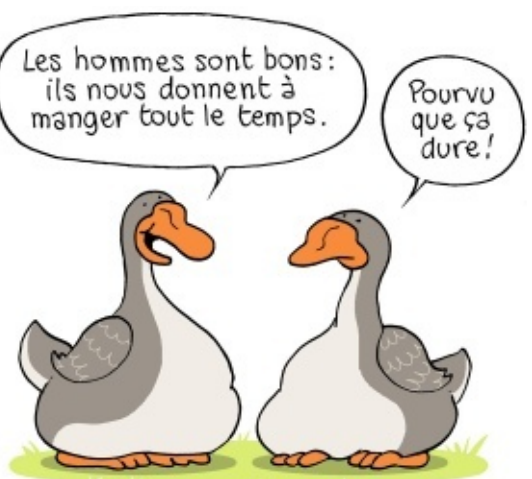
→ VÉRITÉS ERRANTES

Tout porte à penser que la matière a existé avant les hommes, et existera après eux. Les mathématiques me semblent moins durables. J'ai peine à

→ INACCESSIBLE OBJECTIVITÉ

« Les hommes sont mauvais », disent les uns. « Les hommes sont bons », rétorquent les autres. Derrière leur désaccord, ces juges ont un point commun : tous sont hommes. Ils ne sont donc pas seulement juges, ils sont aussi parties. Cela les disqualifie.

Seuls les êtres n'ayant nul contentieux avec les hommes ont l'impartialité voulue pour porter un jugement équitable sur ceux-ci. En existe-t-il ? Oui, sans doute, au



→ JE EST UN AUTRE

Pour éviter d'écrire « je », beaucoup d'auteurs emploient le « nous de modestie ». Mais celui-ci n'a que des défauts. D'abord, il est mal nommé : on peut dire « je » et être humble, comme on peut dire « nous » et être prétentieux. Ensuite, il ajoute des difficultés artificielles à la

lecture. Par exemple, dans une phrase comme « Une telle conception ne nous paraît pas satisfaisante », « nous » peut, selon les contextes, désigner l'humanité actuelle, qui n'accepte plus telle conception autrefois admise ; il peut aussi désigner les Français, ou bien les Occidentaux, ou encore une majorité parmi ceux-ci, majorité au sein de laquelle l'auteur peut, ou non, se ranger... Dans le livre où je l'ai lu, « nous » signifie en fait « je » et est polémique : l'auteur rejette vivement une conception largement dominante. Mais, à d'autres pages, « nous » prend un autre sens. À ne pas dire « je », l'auteur sème de la confusion, donc augmente les risques de faux sens.

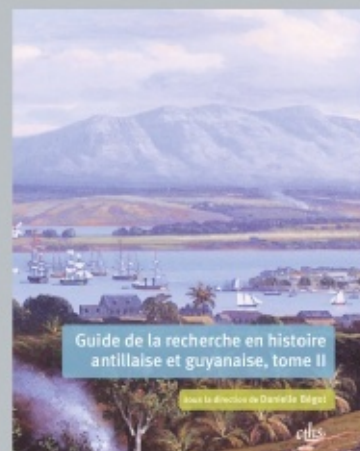
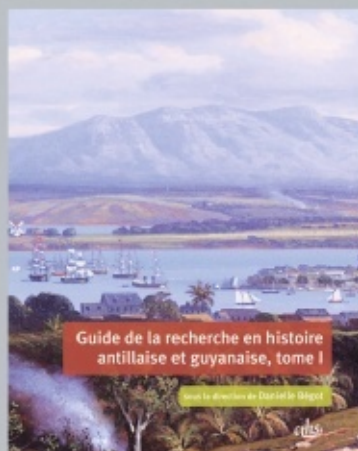
Enfin, dire « nous » au lieu de « je », c'est cautionner la bureaucratie. Si j'écris une ânerie en me cachant derrière un « nous », j'aurai plus de faux-fuyants pour ne pas en répondre que si j'avais dit « je ». Je pourrai prétendre qu'on m'a mal compris ; ce n'est pas moi qui m'exprimais : je me faisais juste l'écho d'une conception que je ne partage pas. Or un des aspects exaspérants de la bureaucratie est que personne n'est jamais responsable de rien. Elle est un « nous » contre lequel l'individu se heurte et ne trouve pas d'interlocuteur.

Auteurs, penseurs, thésards, chercheurs, rapporteurs, éditorialistes et autres chroniqueurs – résistez à la bureaucratie : dites « je » !



Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

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



Guide de la recherche en histoire antillaise et guyanaise Guadeloupe, Martinique, Saint-Domingue, Guyane XVII^e-XXI^e siècle

sous la direction de Danielle Bégot

tome I : 680 p., tome II : 296 p., 17 x 22 cm

ISBN 978-2-7355-0763-4

55 €

Original et attendu, cet ouvrage porte sur une histoire en grande partie construite de façon récente et qui reste encore en cours d'élaboration. Périodisations et catégories utilisées pour d'autres lieux, en particulier les histoires européennes anciennement constituées, ne sont donc pas toujours opérationnelles, ou ne le sont qu'au risque d'une perte de sens. Plus encore, à la vision traditionnelle des terres coloniales d'Amérique perçues depuis la « métropole », s'est superposé depuis quelques années un déplacement du point de vue. Les thématiques, toujours traitées par des spécialistes de la question, répondent à une option dynamique, qui reflète les enrichissements successifs, les virages récents de cette histoire et ses enjeux. S'appuyant sur un important dépouillement de sources et d'études, insistant sur la méthodologie, cette vingtaine de contributions offre un état de la recherche, de ses acquis, de ses perspectives. Destiné aux étudiants, aux chercheurs, à tous ceux intéressés par le sujet, ce *Guide* constitue un préalable indispensable à tout travail et toute réflexion sur l'histoire antillaise et guyanaise.

Danielle Bégot, qui coordonne l'ouvrage, est professeure des universités. Fondatrice et longtemps directrice du laboratoire Archéologie industrielle, Histoire et Patrimoine à l'université des Antilles et de la Guyane, elle est secrétaire de la Société d'histoire de la Guadeloupe et ancienne présidente de l'Association des historiens de la Caraïbe.



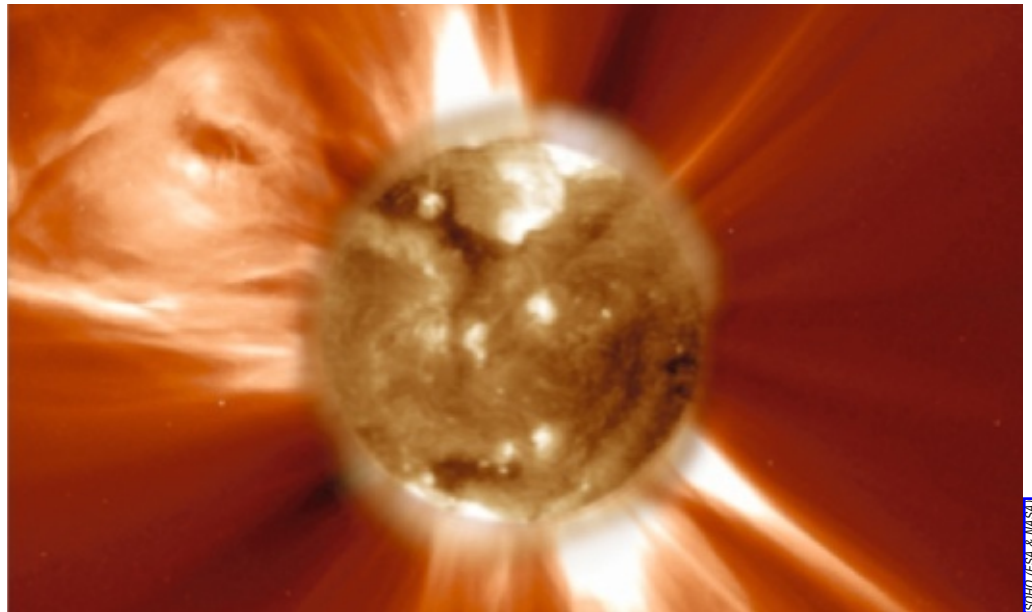
* ventes@cths.fr * vente en librairie ou sur notre site : www.cths.fr * Distribution SODIS *

Planétologie

La Lune soufflée par des bourrasques solaires

Chaque nuage de particules énergétiques éjectées par le Soleil arracherait plusieurs centaines de tonnes de matière à la surface de la Lune.

Une éjection de masse coronale observée le 7 août 2002 par le satellite SOHO, en orbite autour du Soleil. Selon des simulations numériques, une telle bourrasque de particules chargées, en atteignant la Lune, y soulèverait une masse importante de poussière.



SOHO/ESA & NASA

Faute d'atmosphère, aucun vent ne balaye la surface de la Lune. Aucun, sauf les bourrasques de particules chargées éjectées par le Soleil lors des éruptions qui l'agitent régulièrement. Des simulations numériques de l'équipe de Rosemary Killen, du Centre de vols spatiaux Goddard de la NASA, montrent que chacun de ces nuages de particules énergétiques arrache à la surface de la Lune plusieurs centaines de tonnes de poussière.

Les éruptions solaires, ou éjections de masse coronale, propulsent dans l'espace des nuages de plasma – mélange de gaz ionisé et d'électrons – à grande vitesse (entre 100 et 2 500 kilomètres par seconde). Elles se distinguent du vent solaire, qui est un flux de particules émis à faible vitesse. Le champ magnétique terrestre nous protège en partie de ces éruptions en déviant les particules vers les pôles, où elles pénètrent dans l'atmosphère et engendrent les aurores boréales et australes.

La Lune, quant à elle, est dépourvue de champ magnétique et n'est pas protégée par celui de la Terre. Les particules des éjections de masse coronale percutent ainsi sa surface de plein fouet. Elles arrachent les grains de poussière les plus légers sous l'effet de chocs mécaniques, mais aussi sous l'effet de forces électrostatiques, la poussière étant ionisée par le rayonnement solaire. L'équipe de R. Killen a estimé grâce à ses simulations numériques que la Lune perd ainsi entre 100 et 200 tonnes de matière lors de chaque impact, qui dure en moyenne deux jours.

Les éjections de masse coronale érodent bien plus efficacement la surface lunaire que le vent solaire, car elles sont plus denses et plus rapides. En outre, des données satellitaires montrent qu'elles sont enrichies en ions d'hélium, lesquels représentent environ 20 pour cent du flux de particules, contre quatre pour cent pour le vent solaire (le reste étant principalement de l'hydrogène). Or les ions d'hélium, quatre fois plus mas-

sifs que les ions d'hydrogène et deux fois plus chargés, ont un effet abrasif plus important. Il n'est toutefois pas fréquent qu'un nuage de plasma frappe la Lune : ce fut le cas deux fois en 2010 et six fois en 2011. Avec le pic d'activité solaire prévu pour mai 2013, ces événements pourraient se multiplier.

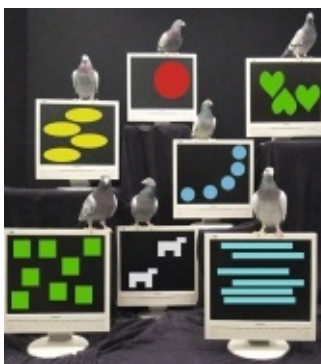
Les éjections de masse coronale auraient aussi des conséquences pour certaines planètes. Ainsi, Mars, elle aussi dépourvue de champ magnétique global, n'est pas protégée contre les bombardements de particules chargées. En revanche, la planète rouge est dotée d'une atmosphère assez dense d'environ 200 kilomètres d'épaisseur. Les nuages de plasma éjectés par le Soleil en arrachent sans doute une partie des couches supérieures. En 2013, la sonde MAVEN (*Mars Atmosphere and Volatile Evolution*) de la NASA étudiera l'impact des éruptions solaires sur l'atmosphère de Mars.

→ Sean Bailey

R. Killen et al., *Journal of Geophysical Research Planets*, à paraître

Éthologie

Les pigeons, numériquement compétents



Quelques-uns des motifs utilisés pour tester la capacité des pigeons à attribuer un ordre numérique à des images.

Les pigeons comptent aussi bien que des primates non humains, en l'occurrence des macaques rhésus. Damian Scarfe et deux collègues de l'Université d'Otago, en Nouvelle-Zélande, l'ont montré en effectuant sur des pigeons des expériences de même type que celles réalisées en 1998 sur les macaques. Ils ont entraîné des pigeons à réagir dans l'ordre numérique croissant à 35 trios d'images contenant un, deux et trois motifs. Puis ils les ont testés avec des paires de nouvelles images contenant un à neuf éléments, ces éléments étant soit des motifs déjà utilisés dans l'étape d'apprentissage, soit des motifs nouveaux. Les performances étaient similaires à celles des macaques. Les oiseaux réagissaient dans l'ordre correct aux paires présentées, avec un taux de réussite allant jusqu'à 90 pour cent (plus de 70 pour cent pour les paires de deux éléments nouveaux). Cette étude confirme que les oiseaux ont de nombreuses capacités, telle l'utilisation d'outils, qui étaient considérées il n'y a pas si longtemps comme l'apanage des primates.

→ Maurice Mashaal

D. Scarfe et al., *Science*, vol. 334, p. 1664, 2011

En bref

LOI D'OHM POUR NANOFILS

On pensait que des effets quantiques limiteraient la miniaturisation des composants électroniques : pour des tailles inférieures à une dizaine de nanomètres, la résistivité des matériaux augmenterait en flèche. Or l'équipe australo-américaine de Michelle Simmons a fabriqué des nanofils de silicium dopé au phosphore ayant une largeur variant entre 1,5 et 11 nanomètres et qui ne semblent pas subir ces effets. Leur résistivité suit la loi d'Ohm classique, ce qui laisse espérer une miniaturisation supplémentaire de l'électronique classique.

DES CHIMPANZÉS AVERTIS

Face à un danger, un chimpanzé estime si ses congénères en sont conscients ou non et les avertis de façon sélective. C'est ce qu'ont montré Catherine Crockford, de l'Université de Saint Andrews, au Royaume-Uni, et ses collègues. Ils ont observé 33 chimpanzés sauvages, confrontés à un serpent. Si le chimpanzé qui remarque le serpent a auparavant vu ses congénères détecter le reptile ou entendu leurs cris d'alarme, il émet moins de cris lui-même.

PETITES COMME LA TERRE

Le télescope *Kepler* a découvert les premières planètes extrasolaires de la taille de la Terre, autour de l'étoile Kepler-20. Avec un rayon de 5 550 kilomètres, Kepler-20e est un peu plus petite que Vénus, tandis que Kepler-20f, dont le rayon est de 6 570 kilomètres, est à peine plus grande que la Terre. Pas d'espoir qu'elles soient habitables, cependant : ces deux planètes, de périodes orbitales de 19,6 et 6,1 jours respectivement, sont chauffées à blanc par leur étoile !

Archéologie

Angkor, débordé par les aléas climatiques

Du XI^e au XV^e siècle, au Cambodge, la civilisation khmère a développé Angkor, le plus important complexe urbain de l'ère préindustrielle. Puis elle a sombré dans l'oubli.

Plusieurs facteurs ont été proposés pour expliquer ce déclin : guerres, surpopulation, contraintes écologiques... Pour y voir plus clair, Mary Beth Day, de l'Université de Cambridge, en Grande-Bretagne, et ses collègues ont étudié les sédiments d'un réservoir d'eau. Ces travaux confortent la thèse du rôle joué par les fluctuations climatiques et suggèrent que les Khmers ont été en quelque sorte dépassés par les événements.

Le site d'Angkor est parsemé de canaux, de douves, de digues et de bassins qui constituaient un important système de collecte et de distribution de l'eau. L'un des plus grands réservoirs est le baray occidental, un bassin de huit kilomètres de longueur et deux de largeur. Les sédiments étudiés ont été prélevés au fond de ce bassin, dans une carotte de deux mètres de longueur correspon-



Angkor Vat, l'un des plus célèbres temples d'Angkor

dant à environ 1 000 ans d'histoire. Qu'ont-ils révélé ?

Les rapports isotopiques du strontium, les taux de sédimentation, la densité des sédiments et leur couleur (qui reflète leur teneur en composés organiques) montrent que le baray occidental a reçu notablement moins de sédiments et d'eau à partir du XIV^e siècle, au moment du début du déclin de l'Empire khmer. Les analyses sédimentaires corroborent aussi les épisodes de sécheresses (aux XIV^e et XV^e siècles) qui avaient été déduits de l'étude

de cernes d'arbres au Vietnam. Ces événements ont alterné avec des périodes de pluie inhabituellement intenses.

D'autres observations sur le site révèlent que l'entretien du système hydraulique n'a pas été suffisant au regard des modifications climatiques et hydrologiques. Ainsi, M. B. Day en déduit que, face à la variabilité extrême du régime météorologique, les Khmers n'ont pas su adapter leur réseau hydraulique, pourtant très élaboré.

→ Loïc Mangin

M. B. Day et al., *PNAS*, à paraître, 2012

En bref

INVISIBILITÉ TEMPORELLE

Moti Fridman et ses collègues de l'Université Cornell, aux États-Unis, ont rendu un bref événement indétectable par un faisceau lumineux parcourant une fibre optique. L'événement en question était une impulsion laser superposée au faisceau. En divisant provisoirement ce dernier en deux composantes se propageant à des vitesses un peu différentes, les physiciens y ont créé un « trou temporel ». Lorsque l'impulsion était émise durant ce « trou », elle n'influait plus le faisceau.

PRÉCOCES ASYMÉTRIES

Une équipe franco-belge de paléoanthropologues a montré que nous partageons avec les hommes préhistoriques et les grands singes africains certaines asymétries cérébrales que nous aurions héritées de notre dernier ancêtre commun. Cela remet en cause les schémas usuels d'évolution cognitive, puisqu'on pensait que ces asymétries étaient apparues plus tardivement chez les hommes et qu'elles étaient liées, entre autres, à l'acquisition du langage.

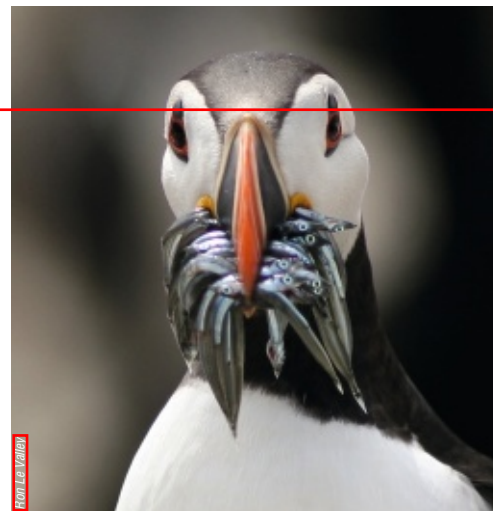
Écologie

Un tiers des poissons pour les oiseaux marins

Une équipe de chercheurs de huit pays, menée par Philippe Cury, de l'IRD (Institut de recherche pour le développement), et Ian Boyd, de l'Université de Saint Andrews, vient de publier une étude qui évalue empiriquement les besoins alimentaires des populations de 14 espèces d'oiseaux de mer, dans sept écosystèmes marins à travers le monde. Les résultats fournissent un ordre de grandeur de la masse minimale de proies (petits poissons et krill) dont les populations d'oiseaux de mer doivent disposer pour ne pas périr : environ un tiers de la biomasse totale.

Alors que la pêche prélève de plus en plus de petits poissons (sardines, anchois, etc.), les oiseaux marins ont de moins en moins de proies. Dans quelle mesure les populations de ces prédateurs en souffrent-elles ? Ph. Cury et ses collègues ont pu préciser le lien entre l'alimentation disponible pour les oiseaux marins et leur succès reproductif. Ils ont examiné des ensembles de données relatives à sept écosystèmes marins, sur neuf sites, couvrant parfois plusieurs décennies et touchant 14 espèces d'oiseaux marins dont le régime alimentaire repose principalement sur le poisson.

L'analyse statistique des données a mis au jour un effet de seuil : lorsque les stocks de poissons sont inférieurs au tiers des valeurs maximales, les nombres de poussins chutent brutalement, quels que soient les sites et les espèces d'oiseaux considérés. Au-dessus de ce seuil d'abondance de nourriture, le succès reproductif n'augmente pas ou presque pas, d'autres facteurs limitants entrant en jeu, tels que la saturation des sites de nidification.



Un macareux moine et sa prise. Les oiseaux marins et les pêcheurs sont en compétition. Pour préserver les populations des premiers et la santé des écosystèmes marins, un tiers de la biomasse totale des petits poissons devrait leur être réservé.

Cette vaste étude montre que la surpêche nuit à la survie des prédateurs supérieurs, du moins les oiseaux marins. Elle a l'intérêt de fournir un chiffre de référence – épargner au moins un tiers de la masse du poisson fourrage – qui peut servir de guide à une gestion durable des pêcheries.

→ M. M.

P. M. Cury et al., *Science*, vol. 334, pp. 1703-1706, 2011

Physique des particules

Boson de Higgs à l'horizon

Le 13 décembre 2011, les porte-paroles des deux principales équipes travaillant auprès du LHC, le grand collisionneur de hadrons du CERN à Genève, ont présenté leurs résultats sur la recherche du boson de Higgs : des signaux pourraient correspondre à cette particule, dont la masse serait alors comprise, en unités d'énergie, entre 124 et 126 gigaélectronvolts.

Le boson de Higgs est un élément clef du modèle standard, la théorie qui décrit les particules élémentaires et leurs interactions, mais il n'a jamais été observé.

Le LHC, mis en service en 2008, a été conçu pour le découvrir. Dans ce collisionneur, les protons accélérés acquièrent une énergie de 3 500 gigaélectronvolts. Chaque collision entre deux protons, avec une énergie totale de 7 000 gigaélectronvolts, produit plus d'une centaine de particules et est susceptible de créer un boson de Higgs, qui se désintègre rapidement, en deux photons par exemple. Les physiciens reconstituent le scénario de chaque collision à partir de tous ceux qui sont possibles et de leurs probabilités, ainsi que des données enregistrées

par les ensembles de détecteurs ATLAS et CMS. Les collisions produisant un boson de Higgs sont, en théorie, très rares : une dizaine, sur près de 400 000 milliards pour la seule année 2011.

Les expériences ATLAS et CMS ont toutefois repéré un signal qui pourrait être celui du boson de Higgs avec un risque d'erreur de 1/1 000 pour ATLAS et 1/100 pour CMS. Pour confirmer la découverte, les deux expériences vont continuer à enregistrer des collisions. La réponse définitive est espérée d'ici la fin de l'année 2012.

→ S. B.



Le détecteur ATLAS du LHC lors de sa construction.

Archéologie

La Dame de Villers-Carbonnel

Pour reconstituer un corps de femme à partir de morceaux épars dans la boue d'une fosse, il faut être... archéologue. Lors de fouilles préventives sur le tracé du futur canal Seine-Nord Europe, les archéologues de l'INRAP ont ainsi reconstitué une statuette portant désormais le nom de Dame de Villers-Carbonnel.

Les 21 fragments de cette vénus néolithique se trouvaient dans un four effondré sur un site du Chasséen (période allant de 4200 à 3500 avant notre ère). Haute de 21 centimètres, elle a été modelée dans une plaque d'argile rectangulaire. Comme souvent chez les vénus de la Préhistoire, les fesses sont proéminentes. Les hanches larges et accentuées amplifient le contraste entre le bassin et la taille. Si le sexe n'est pas représenté, les seins le sont par deux petites boules de pâte étirées. Esquissés par deux bourrelets au niveau des épaules, les bras ne sont pas réellement figurés, ni les mains, tandis que la tête, stylisée et sans visage, est constituée par un simple cône. Le Chasséen n'avait livré jusqu'à présent que peu de vénus, et aucune dans un style aussi abstrait que celui de la Dame de Villers-Carbonnel. C'est bien là ce qui fait son intérêt.

→ François Savatier

La Dame de Villers-Carbonnel de face, de profil et de dos. La statuette a été cuite dans un four contenant des cendres, d'où la couleur sombre. Elle semble avoir été façonnée rapidement et assez grossièrement, suivant des conventions de représentation sans doute familières aux habitants du village chasséen où elle a été retrouvée.



Dominique Bessis / INRAP

Astrophysique

Géante rouge, cœur rapide

Les étoiles tournent sur elles-mêmes, mais tournent-elles d'un bloc ? Une équipe incluant des chercheurs du CEA et de l'Observatoire de Paris vient de montrer par sismologie stellaire que le cœur des étoiles géantes rouges tourne en moyenne dix fois plus vite que leur enveloppe. Une géante rouge est une étoile qui a épuisé l'hydrogène présent dans son cœur. Elle se dilate alors et se refroidit, tandis que son cœur se contracte. La conservation du moment cinétique implique que le cœur tourne plus vite que l'enveloppe, mais cela n'avait jamais été vérifié. L'étude des vibrations de la surface des étoiles permet de caractériser leur intérieur. La rotation des différentes couches, notamment, imprime des motifs caractéristiques dans le signal des modes de vibration observables. Les chercheurs ont ainsi déduit des mesures du satellite américain *Kepler* le profil de rotation en fonction de la profondeur de trois géantes rouges plus massives que le Soleil : leur cœur tourne en quelques semaines alors que l'enveloppe tourne en plusieurs mois.

→ Philippe Ribeau-Gésippe

P. Beck et al., *Nature*, vol. 481, pp. 55-57, 2012

Évolution

La marche a débuté sous l'eau

Il marche et saute sous l'eau...

à l'aide de ses nageoires : ainsi se déplace *Protopterus annectens*, ont montré Heather King et ses collègues de l'Université de Chicago. En étudiant ce dipneuste africain, un poisson sarcoptérygien (à poumons), ils espéraient répondre à une question ancienne : comment les premiers tétrapodes – les premiers animaux vertébrés qui ont marché sur le sol – sont-ils apparus ? En d'autres termes, dans quel ordre les caractéristiques associées à la marche sont-elles apparues au cours de l'évolution ?

Les dipneustes sont, dans l'arbre de l'évolution des espèces actuelles, un groupe frère des tétrapodes. Ils présentent en outre plusieurs traits communs avec des fossiles des premiers tétrapodes, tels des poumons alvéolés et fonctionnels et deux paires de membres (ici des nageoires) très mobiles. Ces similitudes suggèrent que ces traits sont apparus plus tôt, chez un ancêtre commun des dipneustes et des tétrapodes. De même, si des similitudes de locomotion existent, elles pourraient renseigner sur l'ordre d'apparition des principales caractéristiques de la marche : le passage de la vie aquatique à la vie terrestre, l'apparition de membres munis de doigts, la locomotion sur une surface solide en soulevant le corps et la propulsion par alternance des membres inférieurs.

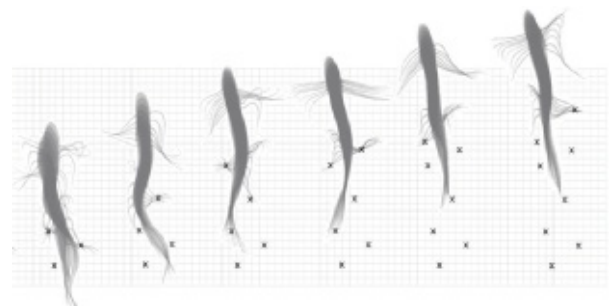
En filmant les mouvements du dipneuste, les biologistes de Chi-

cago ont observé qu'il se déplace en prenant appui sur le sol avec ses nageoires pelviennes, parfois l'une après l'autre, parfois de façon synchrone. Par contraste, le coelacanthé, un cousin des dipneustes et des tétrapodes dans l'arbre de l'évolution, ne s'appuie pas sur le sol pour avancer, mais se déplace lui aussi en actionnant ses nageoires alternativement.

Un scénario semble ainsi se dessiner : certains des premiers sarcoptérygiens se seraient mis à se propulser par alternance des nageoires. Puis un ancêtre commun des dipneustes et des tétrapodes, mais pas du coelacanthé, aurait utilisé le sol comme appui. Les membres munis de doigts et le passage à la vie terrestre seraient apparus plus tard, chez les tétrapodes.

Il n'est pas exclu que ces caractères communs soient apparus dans chaque groupe après leur séparation évolutive. La prochaine étape sera donc de comparer les traces laissées par les dipneustes actuels aux plus anciennes traces de locomotion sur le sol. Ces traces fossilisées datent du Dévonien, il y a environ 400 millions d'années, époque où les dipneustes se sont séparés des tétrapodes. Elles ressemblent à celles des quadrupèdes et bipèdes actuels. Ont-elles été imprimées par des nageoires ou par des pattes ?

→ Marie-Neige Cordonnier

H. M. King et al., *PNAS*, en ligne, 12 décembre 2011

Protopterus annectens, un dipneuste africain long d'une vingtaine de centimètres, se déplace en prenant appui sur le substrat avec ses nageoires inférieures, ici en les alternant (croix).

H. M. King et al., PNAS

En bref

CHENILLES MIMÉTIQUES

Keith Willmott, de l'Université de Floride, et deux collègues ont découvert que certaines chenilles de papillons d'Équateur arborent un même motif de couleurs vives (un corps jaune et des extrémités bleues) alors qu'elles appartiennent à des espèces distinctes. Au moins une espèce signale ainsi sa toxicité ; certaines des autres espèces ont acquis la même livrée par mimétisme, sans être elles-mêmes toxiques. Un tel mimétisme est rarissime chez les chenilles, beaucoup moins chez les papillons adultes.

MOINS DE LATIN BOTANIQUE

Depuis le 1^{er} janvier 2012, les botanistes ne sont plus obligés de publier les descriptions de nouveaux taxons en latin. Ils peuvent aussi le faire en anglais. Cette décision prise lors du dernier Congrès international de botanique, en juillet 2011, devrait faciliter l'enregistrement de nouvelles espèces et rendre les descriptions plus précises, la maîtrise du latin se faisant rare. En outre, il est désormais autorisé de publier ces descriptions dans des livres ou revues électroniques.



Une molécule de structure complexe évoque plus de notes olfactives qu'une molécule de structure simple. En outre, les molécules de structure simple ont des odeurs plus désagréables.

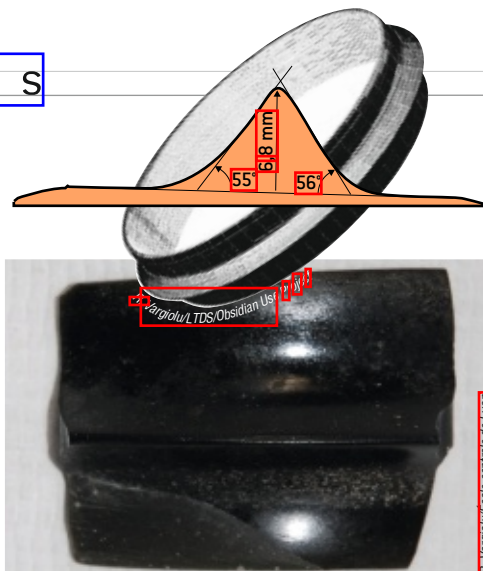
Archéologie

Un fin polissage vieux de 10 000 ans

En 1995, un fragment de bracelet en obsidienne verte, polie à la main au VIII^e millénaire avant notre ère, était mis au jour en Cappadoce dans le village néolithique d'Asikli Höyük. C'est le plus ancien bracelet en obsidienne connu à ce jour. Laurence Astruc, de l'Institut français d'études anatoliennes d'Istanbul (CNRS) et le physicien Roberto Vargiolu, de l'École centrale de Lyon, viennent de montrer que la maîtrise des artisans qui ont réalisé ce bracelet vaut celle de l'industrie mécanique de pointe actuelle.

Asikli Höyük est un village du tout début du Néolithique (Néolithique précéramique). Ses premières maisons en briques crues ont été construites par des chasseurs-cueilleurs, qui commençaient à pratiquer la culture. Leurs armes et outils étaient taillés dans l'obsidienne.

Le fragment de bracelet, réalisé lui aussi dans ce verre volcanique très coupant, suggère que la culture d'Asikli Höyük comportait une classe d'artisans spécialisés dans la réalisation d'objets de prestige. Circulaire, d'un diamètre intérieur de dix centimètres, le bracelet était rehaussé d'une arête sur sa face extérieure (voir l'illustration). Son créateur l'a probablement obtenu par débitage, puis piquetage d'un bloc, suivi d'un évidement de la partie centrale (par forage ?) et d'un polissage fin. De fait, en mesurant la rugo-



La photographie du fragment de bracelet en obsidienne trouvé en 1995, et un schéma du bracelet entier et d'une section (en orange) montrant son arête et ses dimensions.

sité, les chercheurs ont montré qu'aucune aspérité ne dépasse un dixième de micromètre, résultat qui se compare à ceux des meilleurs usinages actuels... Plus étonnant encore, la forme du bracelet a été maîtrisée avec une précision extrême : la forme de l'arête est symétrique à un degré d'angle près, ce qui suggère que les artisans employaient aussi des moyens de mesure élaborés.

Cette maîtrise de l'« usinage » et du polissage est stupéfiante pour une époque aussi lointaine. Elle suggère l'existence dès le VIII^e millénaire d'artisans très spécialisés, voués à satisfaire le besoin d'ostentation des élites riches de la culture d'Asikli Höyük.

→ F.S.

Journal of Archaeological Science, vol. 38, pp. 3415-3424, 2011

Psychophysique

Molécule plus complexe, bouquet plus riche

Moustafa Bensafi et ses collègues, au Centre de recherche en neurosciences de Lyon (INSERM, CNRS et Université de Lyon), ont établi une relation quantitative entre la complexité moléculaire d'une substance odorante et le nombre de notes olfactives (telles que « boisé », « épice », « floral », etc.) que cette substance évoque quand on la sent.

Ces chercheurs ont passé en revue 411 substances odorantes pour lesquelles on dispose de descriptions olfactives établies par des experts (des « nez »). En se restreignant à une liste de 74 notes olfactives jugées les plus pertinentes, proposée en 1988, ils ont

noté le nombre de notes olfactives de chaque molécule en fonction de sa complexité. Cette dernière est mesurée par un indice qui prend en compte la connectivité de la molécule, la diversité des atomes qui y figurent et la symétrie de sa structure.

L'examen de ces données révèle une relation logarithmique entre la complexité moléculaire et le nombre de notes olfactives évoquées : plus la molécule est complexe, plus il y a de notes olfactives.

L'équipe lyonnaise a confirmé ces résultats avec des sujets « naïfs », c'est-à-dire des personnes n'ayant pas un odorat entraîné. L'expérience a de plus montré que

les substances odorantes de faible complexité moléculaire sont perçues comme plus désagréables que les autres.

Les mécanismes neuronaux sous-jacents au lien entre complexité moléculaire et nombre de notes olfactives restent à élucider. M. Bensafi et ses collègues supposent que les molécules odorantes complexes activent davantage de récepteurs olfactifs que les molécules de structure simple, ce qui créerait plus de notes olfactives et rendrait l'odeur plus agréable.

→ M.M.

F. Kermen et al., Scientific Reports, vol. 1, article 206, 2011

Neurosciences

Un circuit cérébral antipanique ?

Les troubles anxieux touchent environ dix pour cent des adultes et regroupent diverses pathologies. Les patients craignent certaines situations ou objets de façon exagérée, ce qui peut être handicapant. Quels sont les mécanismes cérébraux impliqués ? Cyril Herry et ses collègues, de l'Unité INSERM 862 à Bordeaux, en collaboration avec une équipe suisse de l'Institut Friedrich Miescher, à Bâle, ont identifié pour la première fois, chez la souris, les circuits corticaux mis en jeu lors de l'apprentissage de la peur.

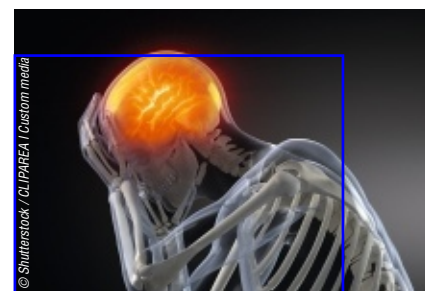
Les chercheurs ont créé un traumatisme chez des souris en

leur apprenant à associer un son avec un stimulus désagréable : un choc électrique sur la patte. Après cette phase d'apprentissage, dès que les souris entendent le même son, elles prennent peur alors qu'elles ne reçoivent plus le choc électrique.

En enregistrant l'activité des neurones du cerveau des souris, les chercheurs ont constaté que lors de l'apprentissage, quand les souris entendent un son au moment où elles subissent un choc électrique, un ensemble de neurones du cortex auditif (les interneurons de la couche 1) s'active fortement. Après apprentissage, cette couche neuronale

s'active même s'il n'y a que le son. Or cette couche est surtout constituée de neurones inhibiteurs, qui bloquent l'activité d'autres neurones situés dans les couches 2 et 3 du cortex. Ces derniers sont aussi des neurones inhibiteurs : inhibés par les neurones de la couche 1, ils n'inhibent plus les neurones sur lesquels ils se projettent, à savoir ceux d'une région corticale qui renforce l'activité de l'amygdale, structure cérébrale profonde dont on sait qu'elle joue un rôle crucial dans le traitement de la peur et de l'anxiété.

En résumé, le son conduit, via l'inhibition d'un circuit inhibiteur dans le cortex auditif, à la stimu-



Un mauvais souvenir peut devenir source d'anxiété s'il est mémorisé de façon exagérée. Un circuit du cortex cérébral participe à l'amplification de cette mémorisation.

lation de l'amygdale et renforce ainsi la mémorisation du stimulus traumatisant. C'est la preuve que le cortex participe à l'apprentissage de la peur et de l'anxiété.

→ **Bénédicte Salthun-Lasalle**

J. Letzkus et al., Nature, en ligne, 7 décembre 2011

17 : c'est le nombre minimal de cases qui doivent être préremplies dans un sudoku pour que sa solution soit unique. Un trio mené par Gary McGuire, à Dublin, l'a prouvé.

Biophysique

Le bouton d'or : briller pour attirer les abeilles

Un jeu d'enfants consiste à placer une fleur de bouton d'or sous le menton d'un camarade pour savoir s'il aime le beurre : si la peau s'éclaire d'une couleur jaune, on décrypte que c'est le cas. Quelle est l'origine de cette lueur ? Beverly Glover, à l'Université de Cambridge, et ses collègues ont précisé les connaissances sur les propriétés optiques des pétales et ont découvert une structure en couches qui renforce la réflexion de la lumière.

On savait que la couleur jaune du bouton d'or est due à des pigments de la famille des caroténoïdes, qui absorbent la lumière bleue et verte. En étudiant les pétales au microscope électronique, l'équipe anglaise a montré que la couche la plus externe des pétales, l'épiderme, est formée de cellules plates contenant les pigments. Elle

est séparée de l'endoderme (une couche plus profonde du pétale et dénuée de pigments) par une mince lame d'air. La lumière incidente est en partie réfléchiée et transmise sur chaque surface : la surface supérieure de l'épiderme, la surface inférieure de l'épiderme et la surface de l'endoderme. L'épiderme réfléchit la lumière dans une direction privilégiée tandis que l'endoderme, qui a un important pouvoir de réflexion, diffuse la lumière vers l'extérieur dans toutes les directions.

Comme les composantes bleue et verte de la lumière sont absorbées par les pigments, la lumière réfléchiée à la surface de l'épiderme est légèrement dominée par le jaune, tandis que la lumière réfléchiée plus en profondeur, davantage filtrée par les pigments, ressort intensément jaune. De plus, la

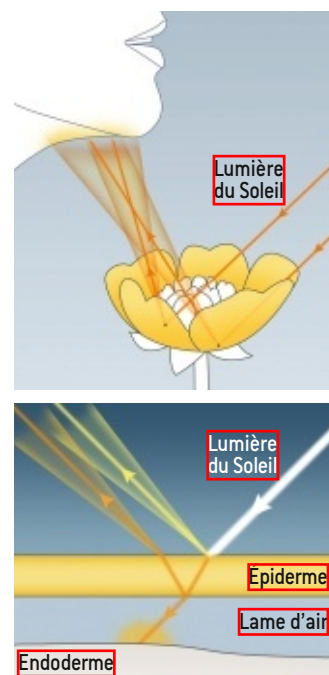
forme concave des pétales permet de concentrer la lumière jaune sur une petite zone, par exemple... le menton d'un enfant.

La brillance du bouton d'or est un facteur important pour attirer les pollinisateurs comme les abeilles, qui peuvent la confondre avec des traces de nectar. Par ailleurs, le bouton d'or réfléchit également le rayonnement ultraviolet, auquel les abeilles sont sensibles. Le bouton d'or attire ainsi les abeilles de deux façons, qui sont la conséquence de la structure et de la géométrie de ses pétales.

→ **S. B.**

S. Vignoni et al., J. R. Soc. Interface, en ligne, 14 décembre 2011

La forme de la fleur concentre la lumière jaune sur une petite surface. L'importante réflexion des pétales vient des propriétés de l'épiderme et de l'endoderme, séparés par une lame d'air.



Botanique

Une plante pour Jeanne Baret

Eric Tepe, de l'Université de l'Utah, a décrit avec Glyns Ridley et Lynn Bohs une nouvelle plante, du genre *Solanum*, qui pousse au Sud de l'Équateur et au Nord du Pérou. Ils l'ont nommée *Solanum baretiae*, en l'honneur de Jeanne Baret, ce qui confère un intérêt historique à cette description d'une nouvelle espèce botanique. Car la botaniste Jeanne Baret (1740-1807) est la première femme à avoir fait le tour du monde. Elle avait embarqué en 1766 à bord du vaisseau *L'Étoile* pour le premier voyage français autour du monde, celui de Louis Antoine de Bougainville, qui s'est achevé en 1769. Embarquer des femmes étant interdit à l'époque, Jeanne Baret s'était déguisée en homme et avait pris place en tant qu'assistant du botaniste Philippe Commerson (1727-1773), son amant. À eux deux, ils ont amassé plus de 6000 spécimens, qui font partie aujourd'hui des collections du Muséum national d'histoire naturelle. Au fil des décennies et des siècles, plus de 70 espèces de plantes ont été nommées en l'honneur de Commerson, mais aucune en l'honneur de Jeanne Baret. Une injustice désormais en partie réparée.

→ M. M.

E. J. Tepe et al., *PhytoKeys*, vol. 8, pp. 37-47, 2012

Astrophysique

Portrait d'une supernova la

A la fin de l'été 2011, les astrophysiciens ont observé dans la galaxie M101 un astre très brillant. Il s'agissait de l'explosion d'une étoile au sein d'un système binaire, ou supernova dite de type Ia, remarquable car c'est la plus proche de ce type jamais observée (à 23 millions d'années-lumière...). L'équipe de Weidong Li et Peter Nugent, de l'Université de Berkeley, a déduit de ces observations que l'étoile ayant explosé avait un rayon au moins dix fois inférieur à celui du Soleil et était riche en carbone et en oxygène. Ces caractéristiques sont typiques d'une naine blanche, ce qui confirme les modèles théoriques : la naine blanche accrète de la matière arrachée à son compagnon et explose quand sa masse atteint 1,4 fois celle du Soleil. Les astrophysiciens ont cependant noté que le système binaire, avant l'explosion, était trop peu lumineux pour que le compagnon de la naine blanche soit une géante rouge, contrairement à ce que l'on pensait. Reste à trouver l'identité du compagnon !

→ S. B.

P. E. Nugent et al., *Nature*, vol. 480, pp. 344-347, 2011 ; W. Li et al., *ibidem*, pp. 348-350

Climatologie

Des forêts pour qu'il pleuve

La déforestation a-t-elle pour conséquence une réduction ou une augmentation des précipitations ? La question restait très débattue. David Ellison, de l'Université suédoise des sciences de l'agriculture, et deux collègues viennent de publier une synthèse qui conclut au rôle positif des forêts pour la disponibilité de l'eau.

Selon une partie des spécialistes, les couverts forestiers absorbent de l'eau au détriment de l'utilisation qui peut en être faite en aval (agriculture, énergie, industrie, foyers domestiques), puisque chaque arbre consomme de l'eau. Pour d'autres spécialistes, l'évapotranspiration fournit de l'eau à l'atmosphère et facilite son transport à travers les continents, ce qui favorise les précipitations aux échelles locales, régionales et globales. Quel camp a raison ?

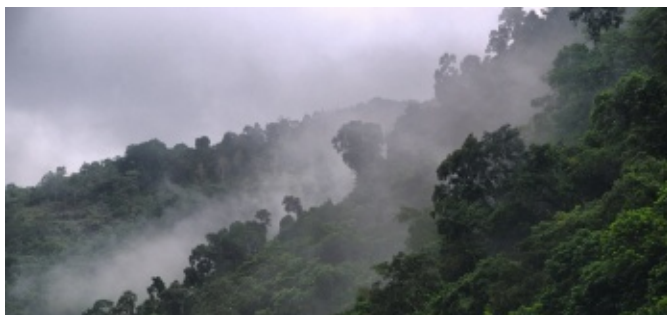
L'étude suédoise met en relief le fait que le premier camp, celui pour lequel les forêts constituent une demande en eau, est représenté par des études réalisées à

l'échelle locale, tandis que le second, pour lequel les forêts constituent une offre en eau, est représenté par des travaux à des échelles plus vastes (régionales). Ainsi, soulignent D. Ellison et ses collègues, des problèmes méthodologiques, liés à l'échelle spatiale étudiée, sont à l'origine des désaccords entre les deux camps. Leur analyse aboutit à la conclusion que la déforestation est globalement défavorable aux précipitations, et que la reconstitution du couvert forestier leur est au contraire favorable, même si localement un effet inverse peut être observé.

Selon l'étude suédoise, l'évapotranspiration par les végétaux contribue fortement aux précipitations sur les régions continentales, et est en général sous-estimée dans les modèles du cycle de l'eau. Les politiques de gestion des ressources en eau ou de l'affectation des sols ainsi que les études climatologiques devraient donc en tenir compte...

→ M. M.

Global Change Biology, en ligne, décembre 2011



© Shutterstock.com/Leslie

DERNIÈRE minute ...

PAPILLONS, OISEAUX ET RÉCHAUFFEMENT

Une équipe internationale menée par Vincent Devictor, du CNRS de Montpellier, a mesuré l'impact du réchauffement climatique sur la répartition des oiseaux et des papillons en Europe. En 20 ans, les courbes de température ont remonté de 249 kilomètres vers le Nord. La répartition des papillons et des oiseaux a aussi glissé vers le Nord, mais avec un retard de 135 kilomètres pour

les premiers et de 212 pour les seconds. L'impact diffère ainsi selon les groupes zoologiques, ce qui menace les équilibres écologiques.

LA ROUTE DU PALUDISME

Le principal parasite responsable du paludisme serait arrivé en Amérique du Sud il y a quelques siècles, via la traite négrière. Des analyses d'ADN ont en effet montré que le parasite sud-américain

est éloigné de celui d'Asie – il n'est donc pas arrivé par le détroit de Béring avec les premiers peuplements humains – et qu'il provient d'Afrique. En outre, il aurait suivi des trajets reflétant les routes empruntées par les convois d'esclaves.



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



Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ VIRUS DE L'ANCIEN MONDE

Au XVI^e siècle, les virus européens ont eu un énorme impact en Amérique. C'est ce que viennent de montrer Brendan O'Fallon et Lars Fehren-Schmitz, des Universités de Washington et de Göttingen, en étudiant à l'échelle des deux Amériques la diversité génétique mitochondriale avant et après ce que les Amérindiens nomment « la catastrophe » (1492). Ils font en effet apparaître qu'il y a environ 500 ans, l'arrivée de ces virus, avant les premiers contacts avec les Européens, a divisé la population féminine des deux Amériques par deux en quelques années (PNAS, novembre 2011)...

Cette constatation explique la disparition des immenses cités-jardins, que l'archéologue Michael Heckenberger a découvertes au milieu de l'Amazonie (voir *Les citées perdues d'Amazonie*, Pour la Science, février 2010, http://bit.ly/388_Heckenberger). Créées par les ancêtres des Kuikuros actuels, ces cités de paysans n'étaient pas rares au XVI^e siècle. En 1542, Gaspar de Carjaval, le missionnaire qui chroniqua la première expédition espagnole à descendre l'Amazone, écrivait en effet : *Nous nous dirigeons vers des îles que nous pensions inhabitées, mais lorsque nous les avons atteintes, les habitats qui s'offrirent à notre vue étaient si nombreux [...] que nous en avions les larmes aux yeux*. Peu après, d'autres explorateurs ont mentionné des cités amazoniennes, puis... plus rien.

→ MÉDICAMENTS ANTISIDA

EN AFRIQUE : PAS SI SIMPLE !

Dans le point fait sur le sida, il y a deux ans (voir *25 ans de sida : où en sont les recherches ?* Pour la Science, mars 2009, http://bit.ly/377_sida), Jean-François Mouscadet, de l'École normale supérieure de Cachan, décrivait la pharmacopée actuelle. Il évoquait les six classes existantes d'antirétroviraux puissants, dont les combinaisons sont à la base des traitements d'aujourd'hui. Si tous échouent à éradiquer le virus, ils peuvent le rendre indé-

→ UN ŒIL À FACETTES ÉVOLUÉ

Avoir bon pied, bon œil aide à survivre. Au Cambrien, il y a 542 à 488 millions d'années, il a d'abord fallu avoir bon œil, révèle une équipe australo-anglo-espagnole, qui a étudié l'organe de vision du pire prédateur de l'époque, un proto-arthropode marin pouvant atteindre un mètre de long et nommé *Anomalocaris* (Nature, 9 décembre 2011). John Patterson, de l'Université de Nouvelle-Angleterre en Australie, et ses collègues ont découvert un œil fossile exceptionnellement bien conservé du super-prédateur. Cet organe était composé d'au moins 16 000 ommatidies – en d'autres termes, au moins 16 000 petites lentilles hexagonales produisant autant d'images traitées par le cerveau, ce qui devait conférer à l'animal une acuité visuelle supérieure à celle d'une mouche (800 ommatidies) ou d'une libellule (plusieurs milliers).

La bonne vision d'*Anomalocaris* pourrait expliquer pourquoi l'évolution de l'œil caméculaire (l'œil à chambre, comme le nôtre) a été rapide. Comme l'écrivait récemment le neurobiologiste australien Trevor Lamb (voir *L'évolution de l'œil*, Pour la Science, octobre 2011, http://bit.ly/408_Lamb), l'essentiel du système de vision des chordés s'est formé en seulement 100 millions d'années, il y a environ 600 millions d'années. Une fois apparu, l'œil à chambre aurait facilité la survie des chordés, dont nous sommes issus, dans les milieux où ils étaient confrontés à *Anomalocaris*. Pour se cacher vite à la vue de prédateurs tels qu'*Anomalocaris*, nos ancêtres cambriens ont eu besoin d'avoir bon œil bien avant d'avoir bon pied !

Vue d'artiste d'*Anomalocaris*

tectable dans le sang et les patients traités deviennent non contaminants, ce qui est essentiel. Malheureusement, des résistances à ces antirétroviraux émergent. Une étude menée par l'équipe germano-tanzanienne de Carsten Scheller, de l'Université de Wurzburg en Allemagne, révèle à quel point (PLoS One, 19 août 2011).

Depuis 2004, environ 200 centres de soins dispensent aux Tanzaniens porteurs du VIH les médicaments financés par plusieurs programmes internationaux. Cependant, au contraire de ce qui est le cas dans les pays industrialisés, les médecins africains ne disposant que de quelques antirétroviraux prescrivent les mêmes traitements à tous leurs patients séropositifs. Dans le même temps, l'Organisation mondiale de la santé a estimé que pour suivre l'apparition de souches virales résistantes aux antirétroviraux, il suffisait d'examiner les souches virales des séropositifs nouvellement infectés, c'est-à-dire en pratique des jeunes de moins de 25 ans. Les

chercheurs ont voulu explorer les limites de cette stratégie en Tanzanie, où 19 pour cent des adultes sont porteurs du virus, et où dans certaines régions un tiers des séropositifs ne reçoivent aucun traitement.

Ils ont examiné les virus portés par 88 patients n'ayant jamais été traités, dont 68 avaient plus de 25 ans. Ils n'ont trouvé aucun cas de résistance chez les moins de 25 ans, mais 19 pour cent des patients plus âgés étaient porteurs de virus résistants aux médicaments ! Cela représente environ 15 pour cent de l'échantillon total. Ne suivre que les jeunes séropositifs serait donc insuffisant...

Les raisons de cette situation sont énigmatiques. L'augmentation de la probabilité de contamination du conjoint en cas d'échec du traitement est l'un des facteurs possibles. Prochainement, les chercheurs vont examiner dans quelle mesure ces résultats inquiétants peuvent être étendus à l'Afrique entière.

→ François Savatier

POINT DE VUE

Conférence de Durban : un non-événement ?

Le sommet sur les questions climatiques tenu à la fin de 2011 a été décevant. Il laisse toutefois espérer la conclusion d'ici 2015 d'un accord international ambitieux.

Christian de PERTHUIS

Hazard du calendrier, la conférence de Durban sur le climat, en décembre dernier, s'est tenue en même temps qu'un autre marathon : celui des chefs d'État à Bruxelles pour sauver le AAA des agences de notation et l'euro. Sauver la planète ou sauver une monnaie commune ? Les médias ont bien compris où était la préoccupation du citoyen. Le sommet climatique a été relégué très loin derrière les premiers titres. Le ballet d'Angela Merkel, Nicolas Sarkozy et David Cameron a envahi tous nos écrans : de leurs décisions dépendent le niveau d'activité des prochains mois et donc nos emplois. La crise climatique ? On attendra que l'économie se porte mieux avant de s'y attaquer plus sérieusement !

Depuis la faillite de la banque *Lehman Brothers* à l'automne 2008, les nuages n'ont cessé de s'accumuler sur l'économie internationale : récession historique en 2009, fragilisation des banques, montée des endettements publics, retombée de l'Europe dans la récession à la suite de la crise des dettes souveraines. Cette toile de fond économique est probablement le paramètre le plus important pour comprendre les méandres des négociations internationales sur le climat.

En décembre 2007, le sommet climatique de Bali a dressé une feuille de route aux négociateurs représentant les gouvernements : trouver un nouvel arrangement international qui puisse prendre le relais du protocole de Kyoto dont la première période d'engagement expire en décembre 2012. Le délai pour y parvenir était de deux ans.

En décembre 2009, le sommet de Copenhague a bénéficié d'une couverture médiatique exceptionnelle. Les principaux chefs d'État ou de gouvernement ont fait le déplacement. Mais les plus grands de ce monde ont été bien incapables de régler en quelques jours des différends que des milliers d'heures de négociation n'avaient pas permis de réduire avant le sommet. Ils ont accouché d'un accord politique, rédigé à la hâte, où chacun promettait d'indiquer les réductions d'émission de gaz à effet de serre auxquelles il est prêt de souscrire.

Rien de tout cela ne ressemblait à un « après-Kyoto ». La crise économique est passée par là et nul ne voulait prendre le moindre engagement qui risquerait de lui coûter quoi

LA CRISE CLIMATIQUE ?
On attendra que l'économie se porte mieux avant de s'y attaquer plus sérieusement !

que ce soit. Une avancée était cependant que, pour la première fois, des pays tels que la Chine, l'Inde ou le Brésil acceptaient d'évoquer des objectifs de réduction d'émission qui pourraient s'appliquer à eux.

Décembre 2011 : le sommet tenu en Afrique du Sud s'est conclu sur ce qu'on a appelé la « plateforme de Durban ». Elle comprend deux décisions principales et un certain nombre d'avancées plus techniques ou procédurales.

D'abord, le prolongement du protocole de Kyoto et de ses mécanismes de flexibilité a été acté, sous forme d'une seconde période d'engagement démarant en 2013.

En pratique, cela signifie que les pays développés devront formuler des cibles d'émissions pour 2017 ou 2020, la durée de la période devant être fixée plus tard. L'absence des pays émergents a induit, comme l'avaient annoncé leurs diplomates, la non-participation de certains pays développés : États-Unis, Canada, Russie et Japon. Parmi ceux-ci, seul le Japon affiche encore la volonté de réduire ses émissions d'ici 2020.

La deuxième décision importante est la fixation d'un nouveau mandat aux négociateurs. Plus précis que celui fixé à Bali, il vise à conclure d'ici 2015 un nouvel accord climatique, impliquant tous les pays, avec un jeu d'engagements débutant en 2020. La principale avancée de Durban est que des pays tels que l'Inde, les États-Unis, la Chine ont accepté de participer au processus. Mais tout reste à faire pour construire le détail de l'accord.

Parmi les avancées techniques, on peut citer l'installation du Fonds vert pour le climat, dont la gouvernance a fait l'objet d'un accord après deux ans de discussion. Mais Durban n'a pas permis le moindre progrès dans son abondement par les pays développés. On a dessiné le contour de la tirelire sans savoir qui y mettra l'argent, ni pour quels montants. Des décisions complémentaires ont porté sur l'amélioration du financement des projets de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les pays en développement (déforestation évitée, capture et stockage du dioxyde de carbone, ...).

La plateforme de Durban a également été accueillie comme un non-événement par les marchés du carbone dans le monde,

sur lesquels toute perspective d'un accord climatique ambitieux repose habituellement le prix du dioxyde de carbone.

À court terme, le sauvetage *in extremis* du protocole de Kyoto est purement formel. Il permet de préserver ses outils, mais pas son esprit initial. Comme seule l'Union européenne et quelques petits pays comme l'Australie ou la Nouvelle-Zélande ont prévu de déposer des engagements, c'est un protocole croupion, couvrant moins de 15 pour cent des émissions mondiales, qui sera en vigueur à partir de 2013.

Si elle doit assumer tout le passif, la plateforme de Durban introduit néanmoins la perspective de parvenir à un accord international plus ambitieux que le protocole de Kyoto d'ici 2015. On a beaucoup discuté la question du statut juridique de ce futur accord. Les vrais enjeux ne sont pourtant

pas là. En l'absence d'une police mondiale, le caractère « juridiquement contraignant » du protocole de Kyoto est purement symbolique. De plus, comme le montre l'exemple du Canada qui a annoncé son retrait du protocole juste après la conférence, on en sort plus facilement que d'un bail à long terme en droit français !

L'important est que, pour la première fois depuis le lancement de la négociation climatique en 1992, les grands pays émetteurs de gaz à effet de serre sont dans la même barque, qu'il s'agisse de pays développés ou des grands pays émergents tels que la Chine, l'Inde, le Brésil. On aura alors une chance historique de passer à une coopération internationale ambitieuse sur le climat. D'autant que le cinquième rapport d'évaluation du GIEC, attendu avant la fin du mandat de négociation (2015), four-

nira une information scientifique complète sur le rythme des changements climatiques et les risques associés. Mais le critère de réussite ne sera pas le statut juridiquement contraignant ou non du futur accord. Ce sera la nature des incitations économiques associées (prix du carbone, financement de la recherche et développement, diffusion de technologies à bas carbone, etc.), incitations qui devront lui permettre de s'intégrer dans un paysage économique en pleine mutation. ■

Christian DE PERTHUIS est professeur d'économie associé à l'Université Paris-Dauphine, où il préside le Conseil scientifique de la Chaire Économie du climat.



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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Le défi de la réintroduction de végétaux disparus

Les îles océaniques sont les espaces naturels où la biodiversité est la plus menacée.

L'un des moyens de la préserver est de réintroduire des espèces quasi éteintes, mais le succès d'une telle entreprise exige notamment un savoir-faire et un suivi rigoureux.

Stéphane BUORD

De l'avis de la plupart des biologistes, une sixième vague d'extinctions de masse, due pour la première fois aux activités humaines, a débuté : le taux d'extinction d'espèces serait aujourd'hui entre 100 et 1 000 fois supérieur au taux moyen qu'a connu la vie sur Terre au cours de son histoire. Cette réduction drastique de la biodiversité planétaire nuit gravement aux grands équilibres de la nature et à la qualité de notre environnement.

La prise de conscience de cette situation a suscité de nombreuses initiatives pour la conservation de la nature. En fait partie la

réintroduction, dans leurs milieux d'origine, d'espèces animales ou végétales disparues ou sur le point de l'être. Et certains territoires concernés retiennent particulièrement l'attention : les îles océaniques. C'est dans ce cadre que le Conservatoire botanique national de Brest vient d'entreprendre la réintroduction à l'île Maurice de 30 plantes endémiques menacées d'extinction – la plus vaste opération de ce type jamais tentée.

Éloignées des continents et soumises à une forte concurrence entre espèces, la faune et la flore des îles océaniques ne sont pas capables de répondre rapidement à des changements radicaux de l'environnement. Ces

espèces insulaires et leurs milieux sont les plus vulnérables au monde et subissent de plein fouet les effets des incendies, des défrichements et autres aménagements du territoire, de la pollution, d'espèces introduites par l'homme, etc.

Les îles Mascareignes, dans l'océan Indien, illustrent parfaitement. Longtemps restées isolées et inhabitées, elles abritent des espèces animales et végétales endémiques particulièrement nombreuses. Ainsi, jusqu'au XVI^e siècle, des forêts luxuriantes recouvraient l'île Maurice. Avec l'arrivée des hommes, les écosystèmes naturels se sont altérés, ce qui a entraîné l'extinction de nombreuses espèces

→ pourlascience.naturejobs.com

Nouveau 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 Lestringuez
E-mail : m.lestringuez@nature.com
Tél. : +44 20 7843 4994

POUR LA SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique

indigènes. La plus célèbre est le dodo, un étrange pigeon géant incapable de voler. Les forêts de l'île Maurice ont été détruites pour laisser place aux cultures de canne à sucre. Aujourd'hui, seules les montagnes abritent encore, sur trois pour cent de leur superficie, des forêts primaires.

L'île Maurice est, après Hawaï et la Nouvelle-Zélande, le troisième pays au monde comptant le plus grand nombre d'espèces disparues. Malgré ce constat alarmant, cette petite île fait partie des 34 points chauds dont la conservation est jugée prioritaire, en raison de son exceptionnelle biodiversité. Le taux d'endémisme y est ainsi parmi les plus élevés au monde (43 pour cent des plantes vasculaires !).

Le Conservatoire botanique national de Brest, premier conservatoire botanique créé au monde (en 1975) et voué à la conservation de la flore menacée, s'est dès son origine intéressé au sort de ces îles océaniques. Sa collection dynamique est aujourd'hui la plus importante au monde pour les espèces insulaires au bord de l'extinction. La mise en culture, souvent réalisée dans l'urgence, y a permis de sauvegarder de nombreuses espèces.

Cependant, cette conservation *ex situ* est un pis-aller. Elle n'a de sens que si elle laisse entrevoir les perspectives d'un retour dans un environnement originel restauré. C'est pourquoi le Conservatoire botanique a entrepris un ambitieux programme de réhabilitation d'une trentaine d'espèces mauriciennes ayant disparu ou presque de l'île, programme qui inclut rapatriements, puis retours dans les milieux naturels.

Près de 30 ans après le sauvetage *in extremis* de ces végétaux, l'opération vient de débuter et s'étalera sur plusieurs années. Elle est l'aboutissement de nombreux efforts. Car une telle entreprise est confrontée à de multiples difficultés. Le cas de l'arbre *Dombeya mauritiana* l'illustre : sa mise en culture, en 1977, s'est faite à partir du seul arbre restant à l'époque, qui était un mâle. Sa sauvegarde a nécessité un traitement hormonal pour transformer des fleurs mâles en fleurs femelles et ainsi, après fécondation, obtenir des graines et des arbres de sexes différents.

Un autre cas, celui de *Cylindrocline lorencei*, a nécessité des biotechnologies de pointe. On ne disposait plus que de graines, que personne n'était parvenu à faire germer. En isolant et en cultivant *in vitro* des groupes de cellules viables découvertes dans les embryons, les scientifiques du Conservatoire, en collaboration avec l'INRA de Ploudaniel, ont réussi dans les années 1990 à régénérer des plantes entières.

LE DÉFI CONSISTE à reconstituer les conditions environnementales favorables.

Les difficultés portent aussi sur la réintroduction elle-même. On ne réimpose pas facilement une espèce à la nature. De fait, statistiquement, seuls 50 pour cent environ des plants réintroduits survivent, et seulement 15 pour cent parviennent à produire des fruits.

Le défi consiste à reconstituer les conditions environnementales favorables. Une récente étude d'une équipe internationale réunie autour de Sandrine Godefroid, du Jardin botanique national de Belgique, liste les points cruciaux qui conditionnent la réussite. Citons la connaissance des habitats originels, la maîtrise des méthodes et techniques de génie écologique, la qualité des coopérations entre acteurs de l'environnement. Inversement, un suivi insuffisant, une mauvaise compréhension des causes de l'extinction, des critères de succès mal définis figurent parmi les facteurs conduisant à un échec.

De plus, ce type d'opérations suppose la restauration d'écosystèmes et des relations écologiques et socio-économiques vitales qui lient les hommes à la biodiversité. Le contexte sociopolitique local a son rôle. À l'île Maurice, où l'environnement et l'écotourisme font aujourd'hui partie intégrante du développement de l'île, ce contexte est favorable et inspirera sans doute de nouvelles initiatives.

Stéphane BUORD est directeur scientifique des actions internationales au Conservatoire botanique national de Brest (www.cbnbrest.fr). S. Godefroid et al., How successful are plant species reintroductions?, *Biological Conservation*, vol. 144(2), pp. 672-682, 2011.

L'Institut Langevin « Ondes et Images »

Unité mixte de recherche ESPCI ParisTech – CNRS

L'excellence d'aujourd'hui

Double lauréat
du Grand Emprunt –
Investissements d'avenir :

- Equipex « UltraBrain »
- Labex « Wifi »

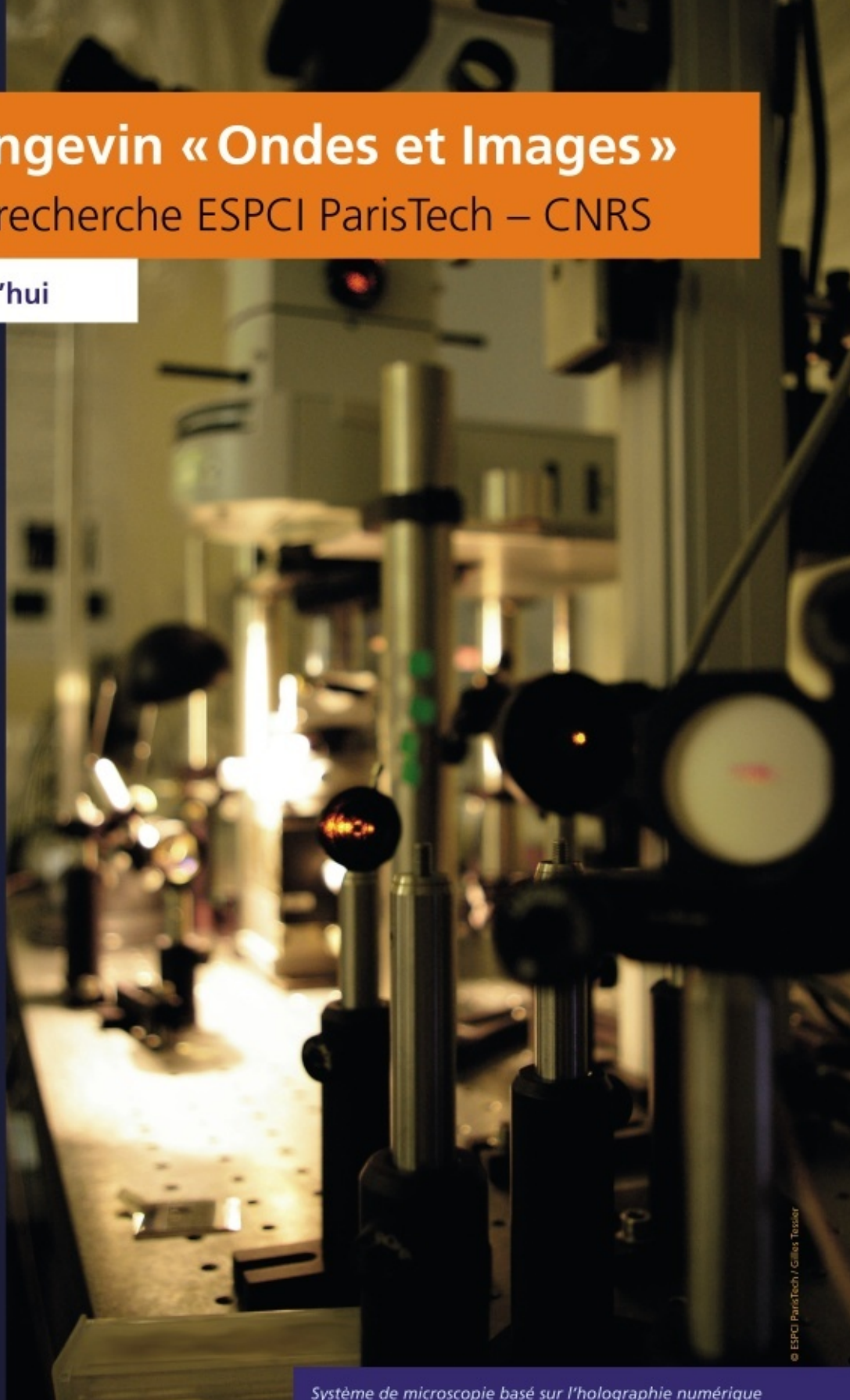
5 entreprises
et plusieurs centaines
d'emplois créés en 10 ans



Mathias Fink, directeur
Professeur ESPCI

Médaille de l'Innovation
2011 du CNRS

Prix Yves Rocard 2011 de la
Société française de physique



*Système de microscopie basé sur l'holographie numérique
mis au point par Gilles Tessier, enseignant-chercheur*



ÉCOLE SUPÉRIEURE DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE INDUSTRIELLES
DE LA VILLE DE PARIS
10, rue Vauquelin | 75005 Paris | www.espci-paristech.fr

VRAI OU FAUX

Les fruits et légumes surgelés sont-ils sains ?

Oui. Ils contiennent autant de vitamines et de nutriments que les produits frais et se conservent plus longtemps.

Nathalie FRISCALE et Jean-Michel LECERF

Sil est conseillé de varier son alimentation et d'y inclure suffisamment de fruits et légumes, il n'est pas toujours évident de concilier cette recommandation avec son travail, les activités extrascolaires des enfants, les tâches ménagères et quelques loisirs... Alors de nombreuses personnes se tournent vers les fruits et légumes congelés et surgelés (nous verrons la différence), car ils sont très vite prêts et semblent bons. Mais sont-ils de bonne qualité nutritionnelle comparés aux produits frais ? Ont-ils du goût ?

La surgélation est un procédé industriel qui consiste à refroidir brutalement un aliment à des températures très basses (jusqu'à -40°C). L'aliment est « figé » et les microbes ou les bactéries sont tués. En revanche, la congélation est une méthode domestique qui permet de conserver des aliments à des températures moins extrêmes (-20°C). Elle ne détruit pas les bactéries, elle ne fait qu'en arrêter la prolifération. C'est pourquoi il ne faut jamais recongeler chez soi un produit décongelé (car on n'élimine pas les bactéries qui ont pu y proliférer à température ambiante).

La surgélation permet de conditionner les fruits et légumes quelques heures après la cueillette, ce qui limite la perte en nutriments, minéraux et vitamines. À l'inverse, à moins de passer directement du potager à la préparation culinaire, les fruits et légumes frais sont fragiles. Ils se détériorent rapidement – les vitamines, dont 25 pour cent se trouvent en surface, sont détruites par le rayonnement ultraviolet et l'oxygène de l'air –, et le temps qui s'écoule entre la récolte et l'assiette peut être long, de la cueillette

au bac du réfrigérateur, en passant par l'emballage, l'entreposage, le transport, l'étal du magasin ou du marché... La surgélation présente toutefois un inconvénient ; avant d'être refroidis, les fruits ou légumes doivent être cueillis, lavés, épluchés et blanchis quelques secondes, une technique qui détruit les micro-organismes et stoppe l'action des enzymes responsables de la décomposition des végétaux. On ne parle pas ici de cuisson, mais d'un petit choc thermique qui n'altère que légèrement l'aliment.

Le plein de vitamines

Des études scientifiques ont comparé la teneur en vitamine C de différents légumes, achetés soit surgelés, soit frais en supermarché ou au marché ; bien souvent, la quantité de vitamine C est aussi élevée dans les deux cas. Elle est même parfois plus importante dans les surgelés.

Les fruits et légumes frais se conservent de quelques jours à quelques semaines, bien moins longtemps que les fruits et légumes surgelés ou congelés. La surgélation offre une cristallisation rapide de l'eau contenue dans l'aliment avec la formation de très petits cristaux de glace, ce qui préserve davantage les cellules végétales et limite les pertes en éléments nutritifs. Cette technique permet une longue conservation des aliments (de 8 à 12 mois). Les aliments congelés se conservent moins longtemps (six mois) ; en effet, le refroidissement plus lent provoque la formation de cristaux plus gros, qui occasionnent des ruptures des membranes cellulaires des fruits et légumes, d'où une perte en liquide et en nutriments lors de la décongélation.



Et le goût ? L'apparition de cristaux de glace, puis leur fonte, peut abîmer les cellules des fruits et légumes, et entraîner la « fuite » de composés gustatifs (avec l'eau liquide). En outre, la surgélation modifie la structure moléculaire de ces composés ; les saveurs s'en trouvent donc atténuées. C'est d'autant plus vrai pour le procédé de congélation, car la perte nutritive et gustative est plus importante, en raison de la taille supérieure des cristaux. Il faut donc préférer des fruits et légumes surgelés aux produits congelés et utiliser des préparations qui contiennent les fruits et légumes avec leur liquide de décongélation (coulis de framboise, soupes...).

Bien qu'ils ne remplacent pas les fruits et légumes crus indispensables à l'équilibre alimentaire, les fruits et légumes surgelés ou congelés constituent un allié de choix pour atteindre les cinq portions de fruits et légumes recommandées par jour. Prêts à l'emploi, ils ont un prix intéressant : les surgelés sont lavés, épluchés et ne contiennent pas de déchets. Ils sont souvent découpés, ce qui permet de n'utiliser que les quantités nécessaires, sans gaspillage.

Pratiques, disponibles à tout moment, les produits surgelés ou congelés facilitent une alimentation variée tout au long de l'année, quelle que soit la saison, et n'ont rien à envier aux produits frais.

Nathalie FRISCALE est diététicienne et Jean-Michel LECERF est médecin nutritionniste, à l'Institut Pasteur de Lille.



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

✓ QU'EST-CE QU'UNE GALAXIE ?

Dans l'article sur le gauchissement de la Voie lactée (*Le côté obscur de la Voie lactée*, *Pour la Science* n° 410, décembre 2011, http://bit.ly/410_blitz), Leo Blitz évoque des galaxies satellites si peu lumineuses qu'elles n'abriteraient aucune étoile, voire pas de gaz ! Peut-on encore parler de galaxies ? Tout comme le sens du mot « planète » a été modifié récemment, la définition des galaxies ne doit-elle pas évoluer ?

Jacques Prestreau

→ RÉPONSE DE BENOÎT FAMAËY, Observatoire de Strasbourg

Vous avez raison, on ne peut pas se contenter simplement de définir une galaxie comme un assemblage d'étoiles, de gaz, de poussières.

La meilleure définition d'une galaxie à l'heure actuelle est sans doute celle d'un système stellaire gravitationnellement lié et non collisionnel. Une dynamique non collisionnelle signifie que le temps caractéristique pour que les rencontres entre les étoiles proches aient une influence est plus long que l'âge de l'Univers. À l'inverse, la dynamique est dite collisionnelle lorsque ces rencontres entraînent des changements significatifs de direction.

Ce critère permet de distinguer les galaxies des amas globulaires, dont la dynamique est collisionnelle. On peut néanmoins réintégrer dans le club des galaxies les objets à la dynamique collisionnelle, mais dominés par un halo de matière noire : en effet, les amas globulaires ne sont pas censés posséder un tel halo.

Toutefois, une définition uniquement fondée sur la présence de matière noire aurait l'inconvénient d'éliminer certaines galaxies supposées sans matière noire, mais dont la dynamique est clairement non collisionnelle, et qui sont bien identifiées comme galaxies. Quant aux hypothétiques « galaxies noires » sans étoiles ou sans gaz, il est à ce stade plus judicieux de ne pas les inclure dans la définition. Leur éventuelle détection relancerait bien sûr le débat terminologique. Pour plus

d'informations, on peut se référer à l'article <http://arxiv.org/abs/1101.3309>.

✓ LES PARADOXES DE L'OMNISCIENCE

L'article de Jean-Paul Delahaye sur l'omniscience (*La logique de la perfection*, *Pour la Science* n° 410, décembre 2011, http://bit.ly/410_delahaye) a suscité de nombreuses réactions. Voici les principales.

1. Dans le jeu illustrant le paradoxe de Newcomb, le premier raisonnement qui conduit à n'ouvrir que la boîte A contenant 1 000 euros est cohérent avec l'hypothèse que l'individu qui propose le jeu est omniscient. Cependant, le second raisonnement, qui conduit à ouvrir les deux boîtes A et B et offre l'espoir d'un gain de 1001 euros, alors que le gain prédit par l'être omniscient doit se limiter à 1 euro, repose sur l'hypothèse inverse, c'est-à-dire qu'il ne peut exister d'être omniscient.



Il est normal que des raisonnements partant de deux hypothèses contraires aboutissent à des conclusions inverses, et cela ne prouve pas l'impossibilité d'un être omniscient.

2. Dans le paradoxe de Moore, comment une personne peut-elle dire à la fois qu'elle connaît la vérité d'une affirmation et qu'elle ne connaît pas l'affirmation elle-même ? N'est-ce pas dépourvu de sens ? Si on fait la distinction entre « connaître la proposition » et « connaître que la proposition est vraie », alors la conclusion du raisonnement n'est pas une contradiction. Les mêmes remarques s'appliquent au paradoxe de Fitch.

3. L'omniscience est-elle un handicap ? Dans le cas du jeu où deux voitures foncent vers un précipice et le conducteur qui saute en dernier gagne, l'omniscience est un avantage plutôt qu'un inconvénient. En effet, elle permet de gagner chaque fois que l'on sait que son adversaire n'ira pas jusqu'au bout. Et face à un adversaire dont on sait qu'il préfère mourir que de perdre, personne ne peut gagner, y compris un être omniscient.

→ RÉPONSES DE JEAN-PAUL DELAHAYE

1. Dans le paradoxe de Newcomb, le second raisonnement ne demande aucune supposition sur l'être prétendu omniscient. Le joueur peut ne pas croire que la personne qui propose le jeu est omnisciente. Le raisonnement utilise seulement la propriété toujours vraie que le contenu de la boîte A plus celui de la boîte B vaut toujours plus que celui de la boîte A seule. Cette conclusion contradictoire avec celle du premier raisonnement prouve donc, par l'absurde, qu'une des hypothèses est fautive, en l'occurrence l'existence d'un individu omniscient. Pour plus de détail sur l'impossibilité de Newcomb, voir : http://en.wikipedia.org/wiki/Newcomb's_paradox

2. La formule discutée dans le paradoxe de Moore, « connu (p et non connu p) », où p est une proposition, n'est pas dépourvue de sens. Elle signifie quelque chose de précis. Si par exemple p est la proposition « il pleut », dire « il pleut et je ne sais pas qu'il pleut » a un sens et peut être vrai ou faux. Si cette phrase est notée P , dire « je sais P » a donc aussi un sens. Il se trouve que c'est contradictoire, comme le montre la première partie du raisonnement. Le paradoxe de Fitch soulève une vraie difficulté que je vous invite à explorer en regardant <http://plato.stanford.edu/entries/fitch-paradox/>.

3. Dans le cas du jeu des voitures, l'omniscience peut bien être un handicap. En effet, par exemple, face à un être omniscient, une façon de jouer est de se bander les yeux et de foncer vers le vide. L'être omniscient sait qu'ainsi vous ne céderez pas, et sautera donc le premier.

Temps universel : faut-il supprimer les secondes intercalaires ?

David Finkleman, Steve Allen, John Seago, Rob Seaman et Kenneth Seidelmann

Le temps indiqué par les horloges a toujours été calé d'une façon ou d'une autre sur les mouvements de la Terre et du Soleil. Mais cette référence astronomique pourrait être abandonnée.

L'ESSENTIEL

- ✓ Le décompte du temps s'appuie depuis toujours sur la rotation de la Terre et sa révolution autour du Soleil.
- ✓ Le Temps universel, fondé sur ces mouvements célestes, est la base du temps légal. Mais il n'est pas assez uniforme, à l'inverse du temps indiqué par les horloges atomiques.
- ✓ Le Temps universel coordonné relie l'un à l'autre par l'ajout de secondes intercalaires, ce qui pose quelques difficultés techniques.
- ✓ Certaines instances proposent de supprimer les secondes intercalaires. Cela reviendrait à affranchir le temps légal du mouvement des astres.

Photo: © Shutterstock/Andrii

« Depuis des temps immémoriaux, les moyens utilisés universellement pour marquer le passage du temps sont les mouvements apparents des corps célestes ; et la mesure du temps, que ce soit par les heures du jour et de la nuit ou par les intervalles plus longs impliqués dans les calculs calendaires et chronologiques, dépend encore des mouvements célestes. D'autres moyens, comme les horloges, ne sont que des auxiliaires ou des intermédiaires. »

Ces propos des astronomes américains Edgar Woolard et Gerald Clemence datent de 1966, c'est-à-dire hier à l'échelle de l'histoire de la mesure du temps par l'homme. Mais ce qui était alors une vérité intangible – le temps civil est *in fine* fondé sur le mouvement des corps célestes – pourrait bientôt être remis en cause. Un organisme des Nations unies, le secteur radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (ITU-R), pourrait briser définitivement ce lien en adoptant une nouvelle définition du Temps universel coordonné (UTC).

Le Temps universel coordonné est le successeur moderne du Temps moyen de Greenwich, ou GMT (*Greenwich mean time*).

Depuis 1972, c'est la base du temps légal dans la plupart des pays du monde. Il est établi par un décompte des secondes du Système international (SI). Or cette unité est définie comme la durée de 9 192 631 770 périodes du rayonnement émis par la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133, phénomène physique complètement indépendant de la rotation de la Terre ou de tout autre phénomène céleste.

Auparavant réglées sur les mouvements célestes, les horloges civiles sont ainsi aujourd'hui calées sur le temps des horloges atomiques. Cependant, la durée du jour solaire, définie par la rotation de la Terre sur elle-même, est un peu plus longue que celle du jour définie par le décompte des secondes atomiques. C'est pourquoi des secondes intercalaires sont ajoutées de façon ponctuelle aux flux du temps atomique pour conserver la synchronisation du Temps universel coordonné avec la durée réelle de la rotation de la Terre. Ces secondes intercalaires sont un moyen *ad hoc* de concilier deux mesures du temps fondamentalement différentes, mais toutes deux utiles.

L'ITU-R propose aujourd'hui d'abandonner l'insertion des secondes intercalaires, c'est-à-dire de caler le Temps universel coordonné sur le Temps atomique, et non plus sur le temps déduit des mouvements célestes. Ce bouleversement aurait des

implications scientifiques et techniques, mais aussi légales et philosophiques. Le mot *jour* conservera-t-il son sens originel, c'est-à-dire « la durée d'une rotation de la Terre autour de son axe » ou signifiera-t-il « la durée de 794 243 384 928 000 périodes de l'émission du césium 133 » ? Faut-il définitivement renoncer à suivre la rotation de la Terre pour mesurer le temps ? Et en quoi ce changement de définition serait-il utile et souhaitable ? Examinons cette situation sans précédent.

Ajouter des jours aux calendriers

Un calendrier est un système permettant de définir la suite des jours sur de longues périodes de façon cohérente avec les cycles lunaires et solaires. La durée moyenne d'un jour solaire n'est pas un diviseur exact des périodes orbitales de la Terre ou de la Lune. En d'autres ter-

mes, l'année ne dure pas exactement 365 jours, ni le mois lunaire 29 jours. Ainsi, les saisons se décaleraient progressivement au fil des ans si les calendriers n'étaient pas régulièrement ajustés.

Les civilisations antiques avaient compris qu'une révolution de la Terre autour du Soleil, ou année tropique, dure approximativement 365,25 jours. C'est pourquoi le calendrier établi en 45 avant notre ère par Jules César, le calendrier julien, comportait un jour intercalaire supplémentaire tous les quatre ans (année bissextile).

Nous savons aujourd'hui que l'année tropique est un peu plus courte : 365,2422 jours en moyenne. En s'accumulant, ce léger écart de 0,002 pour cent avait fini par décaler le calendrier julien de dix jours par rapport à la course réelle du Soleil lorsque le pape Grégoire XIII s'attaqua au problème, au XVI^e siècle ! Pour rattraper cet écart, on décréta que le vendredi 15 octobre 1582 suivrait directement

1. LES SECONDES INTERCALAIRES

sont ajoutées à la fin du dernier jour de certains mois. La dernière minute vaut alors 61 secondes. Cet usage va-t-il être supprimé ?



le jeudi 4 octobre. Par ailleurs, on décida d'omettre trois jours intercalaires tous les quatre siècles (les années séculaires ne sont bissextiles que si leur millésime est divisible par 400).

Ce nouveau calendrier dit grégorien fut plus ou moins vite adopté selon les pays. La Grande-Bretagne et ses colonies (et plus généralement les pays protestants et orthodoxes) résistèrent pendant deux siècles. George Washington est par exemple né le 11 février 1731 selon le calendrier julien, mais son anniversaire est célébré le 22 février, le calendrier grégorien ayant été adopté sur la côte Est des États-Unis de son vivant, en 1752.

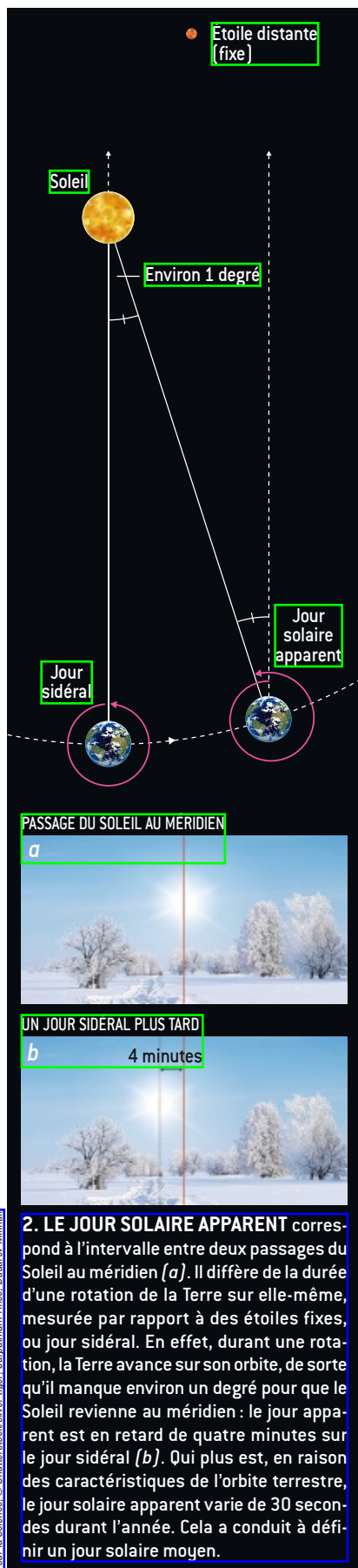
Le calendrier grégorien (365,2422 jours) est aujourd'hui utilisé dans le monde entier pour les usages officiels. L'islam utilise un calendrier purement lunaire comportant 12 mois de 29 ou 30 jours (une lunaison réelle dure 29,53 jours), soit en moyenne 354 jours. Il se décale donc chaque année de 11 jours par rapport au calendrier grégorien et aux saisons. D'autres systèmes dits luni-solaires, tel le calendrier chinois, maintiennent une proximité avec l'année tropique et les saisons en introduisant ponctuellement un mois lunaire intercalaire occasionnel. Certaines années ont ainsi 13 mois.

Ces calendriers nécessitent une table de conversion avec le calendrier grégorien pour les échanges internationaux. De façon plus générale, pour interpréter une date, il faut ainsi comprendre à la fois les règles du calendrier actuel et celles du calendrier utilisé à l'époque et dans la culture où s'est déroulé l'événement.

Des ajouts de jours ou de mois intercalaires sont par ailleurs inévitables dans tous les calendriers pour suivre l'année solaire réelle, et ces ajustements persisteront dans le futur.

Ajouter des secondes aux horloges

Les secondes intercalaires obéissent à une logique analogue à celle des jours et mois intercalaires, mais elles prennent leur sens à une échelle beaucoup plus fine. La précision des dispositifs de mesure actuels nous oblige à corriger les écarts infimes entre la durée de la rotation terrestre et le temps indiqué par les horloges atomiques. Cette synchronisation est obtenue en ajoutant des secondes intercalaires au Temps universel coordonné. Comment ces ajustements sont-ils définis



et appliqués ? Pour le comprendre, retraçons l'histoire du Temps universel.

Tandis que les calendriers comptent les jours, les horloges les divisent. Écoulements de sable ou d'eau, oscillation de pendules, vibration de cristaux ou raies d'émission d'atomes, des moyens de plus en plus élaborés ont été utilisés pour découper les durées en petites unités égales. Les civilisations antiques divisaient les jours et les nuits en 12 heures. Cette heure variable (car la durée entre le lever et le coucher du soleil varie avec la période de l'année et la latitude), dite temporaire, fut en usage jusqu'au Moyen Âge. Pour leurs calculs, les astronomes utilisaient quant à eux l'heure temporaire mesurée à l'équinoxe. La division des heures et des minutes en 60 sous-unités provient des fractions babyloniennes en base sexagésimale (60, un entier aisé à fractionner). Ainsi, pour le sens commun, un jour comporte 24 heures, une heure compte 60 minutes, et une minute, 60 secondes. L'acception traditionnelle de la seconde est ainsi $1/86\,400^e$ d'un jour.

Plusieurs définitions pour le jour

Cependant, plusieurs définitions astronomiques du jour coexistent. Le jour solaire apparent (ou vrai) est l'intervalle entre deux passages du Soleil au méridien du lieu (le demi-grand cercle sur la sphère céleste passant par les pôles célestes et le zénith). On peut le mesurer avec un simple cadran solaire. Cependant, en raison de l'inclinaison de l'axe de rotation terrestre par rapport au plan de son orbite (écliptique), et de l'excentricité de celle-ci, le jour solaire apparent varie de plus ou moins 30 secondes au cours de l'année. Une illustration de ce phénomène est l'analemmé, la trajectoire en forme de 8 que semble décrire au fil de l'année le Soleil observé chaque jour au même moment (voir la figure 3).

Le jour sidéral correspond quant à lui à un tour de la Terre sur elle-même, mesuré par rapport à des étoiles fixes (voir la figure 2). Cette durée est plus uniforme, car elle ne dépend pas de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Comme la Terre avance sur son orbite durant sa rotation, le jour solaire apparent est, en moyenne, environ quatre minutes plus long que le jour sidéral.

Les variations de la durée du jour solaire apparent ont conduit dès l'Antiquité à définir le jour solaire moyen, d'une

durée uniforme, qui suit un Soleil « idéal », qui reviendrait au méridien au bout de 24 heures précises. C'est le temps solaire le plus adapté pour une utilisation des horloges civiles. L'écart du jour moyen par rapport au jour solaire apparent est régi par une relation nommée équation du temps (voir l'encadré ci-dessous).

Jusque dans les années 1960, la seconde fut ainsi définie comme le $1/86400^{\text{e}}$ du jour solaire moyen, fondé sur la rotation de la Terre sur elle-même. L'échelle de temps issue de cette définition est le « Temps solaire moyen de Greenwich » (GMT).

Rotation contre révolution

Cependant, la rotation de la Terre est légèrement irrégulière. Les positions de la Lune prédites en utilisant le temps solaire moyen étaient un peu incertaines. Par ailleurs, la Lune capte par le biais des marées une minuscule fraction du moment cinétique de la Terre, ce qui ralentit peu à peu la rotation de notre planète.

Or dès la fin du XIX^e siècle, Simon Newcomb, le directeur de l'*US Nautical Almanac Office*, qui publiait des données astronomiques nécessaires aux astronomes, aux géomètres et aux navigateurs, avait calibré la durée de l'année tropique avec une précision sans précédent. En faisant la moyenne des diverses petites variations sur la base d'observations astronomiques remontant jusqu'à 1750, il était arrivé à une équation très précise décrivant la position de la Terre autour du Soleil, et qui s'imposa rapidement comme une norme internationale.

Dans les années 1930, on fit la distinction entre le temps utilisé dans les équations de Newcomb, fondé sur la révolution de la Terre autour du Soleil, qualifié de Temps des éphémérides (TE), et le Temps moyen de Greenwich, fondé sur la rotation de la Terre.

La différence entre le Temps des éphémérides et le Temps de Greenwich peut être déduite de la différence entre la position observée de la Lune ou d'une planète et la position prédite par les tables

LES AUTEURS

David FINKLEMAN est chercheur au Centre pour les normes spatiales et l'innovation de la Société *Analytical Graphics* et coordinateur du groupe de travail des opérations spatiales de l'Organisation internationale de normalisation.

Steve ALLEN est programmeur et analyste à l'Observatoire Lick de l'Université de Californie.

John SEAGO est ingénieur en astrodynamique pour la Société *Analytical Graphics*.

Rob SEAMAN est ingénieur informaticien à l'Observatoire national d'astronomie optique américain.

Kenneth SEIDELMANN est professeur d'astronomie à l'Université de Virginie et ancien directeur de l'astrométrie à l'Observatoire naval américain.

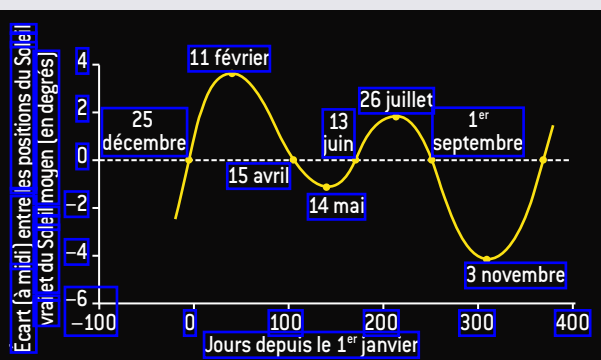
Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

L'équation du temps

Le temps solaire « vrai », l'échelle de temps liée au Soleil que l'on observe et qui est mesurée par les cadrans solaires, traduit à la fois le mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil et son mouvement de rotation sur elle-même.

Cependant, ce temps n'est pas régulier. L'intervalle de temps entre deux passages consécutifs du Soleil « vrai » au méridien, nommé jour solaire vrai, varie entre 23 h 59 min 39 s et 24 h 00 min 30 s. Par exemple, à Paris, le 1^{er} janvier 2012 a duré 24 h 00 min 28 s, mais le 1^{er} septembre durera 23 h 59 min 40 s.

Il y a deux raisons essentielles à cette non-uniformité. D'une part, le mouvement apparent du Soleil dans le ciel ne décrit pas l'équateur céleste (projection de l'équateur terrestre et plan de référence pour la mesure du temps, car 24 heures correspondent à 360 degrés), mais un grand cercle nommé écliptique, incliné de 23° 26' en raison de l'obliquité de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de son orbite. Ainsi, lorsque le Soleil se déplace par



exemple de un degré sur l'écliptique, sa projection sur l'équateur mesure un peu moins de un degré.

D'autre part, en vertu de la deuxième loi de Kepler, la Terre se déplace plus vite lorsqu'elle est proche du Soleil (en hiver pour l'hémisphère Nord) et moins vite lorsqu'elle est loin.

Les astronomes ont donc défini, dès l'Antiquité (au moins dès Ptolémée, au II^e siècle de notre ère), un jour solaire moyen, qui correspond au retour d'un Soleil idéal, appelé Soleil moyen, au méridien du lieu après exactement 24 heures. Au fil des jours,

le retard ou l'avance du Soleil vrai par rapport au Soleil moyen s'accumule. La relation entre le temps solaire vrai et le temps solaire moyen, qui tient compte des deux effets décrits précédemment, est nommée équation du temps.

L'écart peut atteindre -16 minutes début novembre et +14 minutes en février : le Soleil vrai passe alors au méridien 14 minutes après le Soleil moyen.

À l'inverse, l'équation du temps s'annule quatre fois par an. Le temps solaire moyen coïncide alors avec le temps solaire vrai.

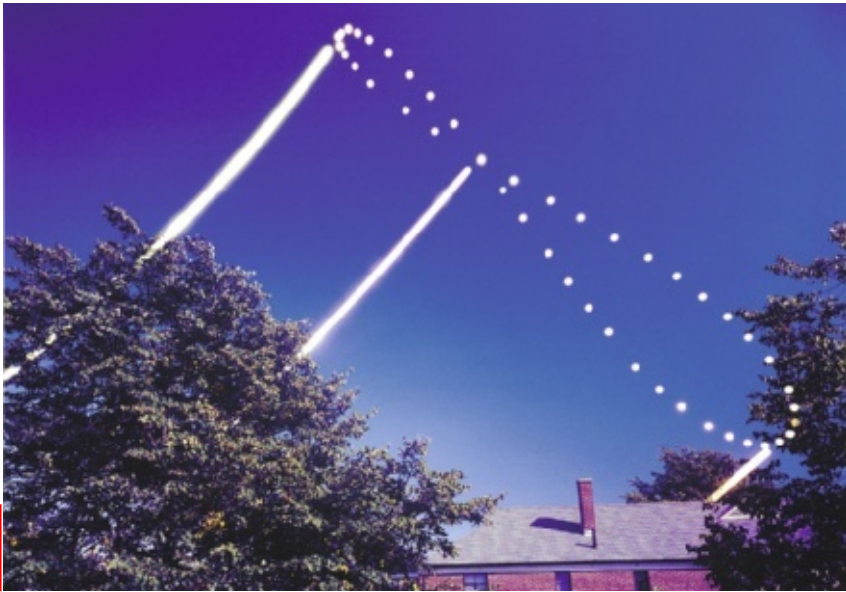
C'est vers le solstice d'hiver que les jours solaires vrais (intervalle entre deux passages au méridien) sont les plus longs, et vers l'équinoxe d'automne qu'ils sont les plus courts.

Le temps civil d'un lieu est le temps solaire moyen de ce lieu augmenté de 12 heures, de sorte qu'il soit égal à 00 h au milieu de la nuit. Ainsi le Temps universel UT est le temps solaire vrai du méridien de Greenwich, corrigé de l'équation du temps, plus 12 heures.

En fait, on a négligé ici dans l'équation du temps des termes de second ordre qui décrivent les variations de la rotation de la Terre dues à des termes périodiques saisonniers, des fluctuations irrégulières imprévisibles et le ralentissement séculaire dû aux marées. Ce sont toutes ces inégalités qui ont conduit à abandonner le Temps universel au profit d'échelles de temps plus uniformes.

Denis Savoie

Directeur du Département d'astronomie et du planétarium au Palais de la Découverte, Paris



Dennis di Cicco

3. L'ANALEMME ILLUSTRE LA VARIATION DU JOUR SOLAIRE APPARENT. En raison de l'obliquité de la Terre et de son orbite elliptique, le Soleil, observé chaque jour du même lieu à la même heure, ne revient pas exactement au même point : il décrit ainsi en une année une courbe en forme de huit. Dennis di Cicco, du magazine *Sky & Telescope*, a réalisé cette toute première photographie de l'analemma entre février 1978 et février 1979 (les traits correspondent à la trajectoire du Soleil depuis son lever, à trois dates distinctes).

Glossaire

- ✓ **JOUR SOLAIRE VRAI** : intervalle entre deux passages successifs du Soleil au méridien.
- ✓ **JOUR SOLAIRE MOYEN** : jour solaire vrai corrigé des variations induites par les caractéristiques orbitales de la Terre. Il vaut exactement 24 heures.
- ✓ **TEMPS UNIVERSEL (UT)** : échelle de temps fondée sur le jour solaire moyen. Jadis appelé Temps moyen de Greenwich (GMT), sa version la plus précise est nommée UT1. Le Temps universel est légèrement variable à court terme, et ralentit à long terme.
- ✓ **TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL (TAI)** : échelle de temps fondée sur l'écoulement des secondes du Système international, calibrées par la fréquence d'un rayonnement de l'atome de césium 133. C'est le temps le plus régulier qu'on ait défini.
- ✓ **TEMPS UNIVERSEL COORDONNÉ (UTC)** : échelle de temps qui suit le Temps atomique et qui est synchronisée avec le Temps universel par l'ajout de secondes intercalaires. C'est la base du temps civil.

de Newcomb. Cette conversion est néanmoins lente et fastidieuse, au point que Gerald Clemence, lui aussi à l'*US Nautical Almanac Office*, déclara en 1948 que le Temps des éphémérides était destiné aux astronomes et autres scientifiques, tandis qu'il était logique de continuer à utiliser le Temps solaire moyen (le Temps universel) pour les besoins civils.

En 1960, pourtant, on décida de fonder l'unité de temps du Système international (la seconde) sur le Temps des éphémérides, et non plus sur le Temps moyen de Greenwich, renommé à l'occasion Temps universel (UT). La seconde fut ainsi définie comme une fraction de l'année tropique. La constance de cette unité était parfaitement adaptée aux théories du Système solaire ou à l'étalonnage des fréquences électromagnétiques.

L'avènement du Temps atomique

Mais déjà à cette époque, les horloges atomiques étaient capables de mesurer très précisément des durées. En 1958, Louis Essen, du *National Physical Laboratory* en Angleterre, et William Markowitz, de l'*US Naval Observatory*, avaient déterminé la fréquence du rayonnement émis lors de la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'atome de césium 133, qui corres-

pondait le mieux à la durée de la seconde des éphémérides. Et en 1967, la seconde des éphémérides fut abandonnée par le Système international au profit d'une seconde fondée sur cette fréquence atomique. En quelques années, l'écoulement des secondes atomiques, établi et coordonné par le Bureau international des poids et mesures, à Sèvres, devint le Temps atomique international (TAI).

De nombreuses applications scientifiques et techniques dépendent de la durée parfaitement constante des secondes atomiques du Système international. Pour autant, il n'y a jamais exactement 86 400 secondes atomiques dans un jour solaire du Temps universel. La différence n'est que de quelques millisecondes par jour, mais la mesure du temps avec des horloges atomiques conduit à une échelle de temps sensiblement différente du Temps universel. En d'autres termes, le Temps universel dérive par rapport au Temps atomique international.

Or la plupart des lois, des usages et des technologies définissent la mesure du temps civil par le Temps universel. De même, les observations astronomiques et les missions spatiales imposent l'utilisation du Temps universel, qui suit la rotation de la Terre.

Garder le lien avec le Temps universel

Comment dès lors concilier le temps astronomique et le temps atomique ? La première solution, en vigueur durant les années 1960, a été d'introduire des « sauts » de moins de 0,1 seconde et des secondes de longueur variable par rapport aux étalons atomiques dans les signaux radio qui diffusaient le Temps universel (l'équivalent de dix secondes a ainsi été ajouté au Temps universel). Mais cette pratique compliquait la mesure d'un intervalle de temps précis ou l'étalonnage des fréquences électromagnétiques, car la durée d'une seconde du Temps universel variait par rapport aux étalons atomiques de fréquence.

En 1972, on a abandonné ce système au profit de secondes intercalaires et défini le Temps universel coordonné (UTC). Ce concept a été précisé par l'Union astronomique internationale (UAI) et défini officiellement par le Comité consultatif international de radiocommunication (CCIR), un précurseur de l'ITU-R.

Des secondes intercalaires entières maintiennent la relation entre le Temps

atomique international, immuable, et une version du Temps universel fondée sur la rotation – pas tout à fait constante – de la Terre mesurée par rapport à des sources radio lointaines, appelée UT1 (l'UT1 et l'UT diffèrent de moins d'une seconde à tout moment).

L'insertion d'une seconde intercalaire est décidée quand l'écart entre l'UT1 et l'UTC va dépasser 0,9 seconde. Une seconde intercalaire est alors ajoutée à l'UTC, et affichée comme 23 h 59 min 60 s, ce qui accroît la durée d'un jour UTC tout en maintenant un marquage du temps continu et sans ambiguïté. Cet ajout est prévu six mois à l'avance et toujours à la dernière seconde du dernier jour d'un mois (en pratique, juin ou décembre ; la prochaine sera ajoutée en juin 2012).

À ce jour, 24 secondes intercalaires ont été introduites. Elles sont insérées simultanément dans le monde entier. Elles apparaissent ainsi plus tôt ou plus tard en temps local pour chaque fuseau horaire, par rapport au méridien de Greenwich.

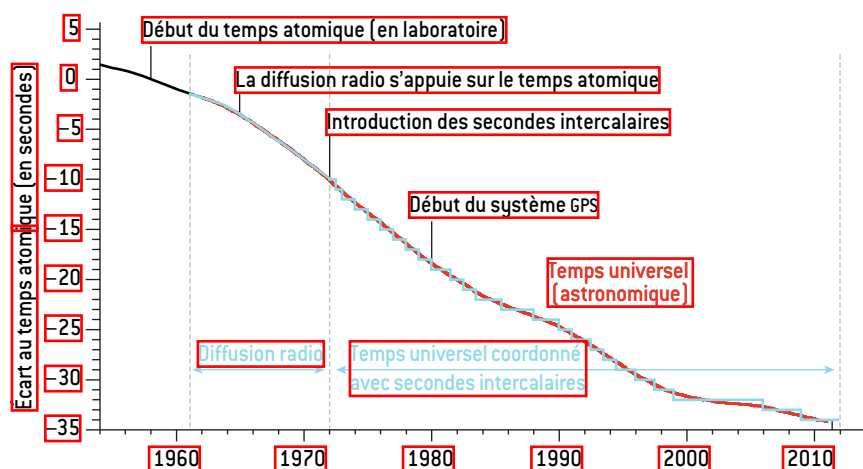
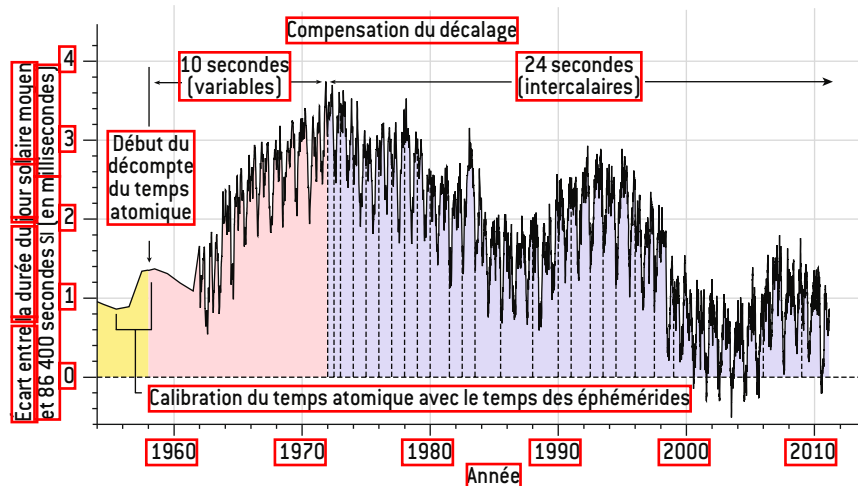
Qui définit le temps ?

Qui établit le Temps universel coordonné ? En fait, cette responsabilité est partagée entre différents organismes. Comme évoqué, le Temps atomique international est établi par le Bureau international des poids et mesures, à Sèvres. Le Service international de rotation de la Terre (IERS), à l'Observatoire de Paris, détermine pour sa part quand il faut ajouter une seconde intercalaire en surveillant la rotation de la Terre avec une extrême précision. Mais historiquement, quand l'UTC a été institué, les émissions radio en ondes courtes étaient le principal moyen de transmission en temps réel, si bien que le secteur radiocommunications de l'Union internationale des télécommunications (UITU-R) devint responsable du maintien du Temps universel coordonné. Cette institution, simple instance de contrôle administratif, n'est pourtant en rien impliquée dans le développement de l'échelle de temps (par ailleurs, l'UTC peut aujourd'hui être obtenu, avec différents niveaux de fidélité, par de nombreux autres moyens : système de géolocalisation mondial ou GPS, satellites de télécommunications ou météorologiques, ou encore protocoles de minutage d'Internet).

La plupart des gens ignorent tout du Temps universel coordonné et pen-

sent qu'un jour est exactement égal à $24 \times 60 \times 60$ secondes, comme on l'apprend depuis l'enfance. Même les concepteurs de logiciels et les fabricants de matériel informatique ne connaissent pas toujours le problème des secondes intercalaires, ou l'ignorent purement et simplement.

Cette méconnaissance est en règle générale sans conséquences. Il y a très peu d'applications qui nécessitent réellement de déterminer le temps relativement à l'UTC à la seconde près. En particulier, nos ordinateurs sont de mauvaises horloges : ils se décalent jusqu'à plusieurs minutes par jour ! La plupart sont programmés pour se synchroniser avec une horloge externe. De nombreux dispositifs en réseau négligent l'insertion de secondes intercalaires



4. LE TEMPS UNIVERSEL DÉFINI PAR LA ROTATION DE LA TERRE n'est pas constant, comme l'illustre le graphique du haut, qui montre la différence entre un jour de 86 400 secondes indiquées par les horloges atomiques et la durée du jour solaire moyen. Le graphique du bas montre l'écart entre le Temps universel coordonné (courbe bleue) et le temps atomique, ainsi que les 24 secondes intercalaires ajoutées depuis 1972 pour conserver la synchronisation avec le Temps universel (courbe rouge). Si l'on ajoute 10 secondes variables comme auparavant, le Temps universel coordonné est en retard sur le Temps atomique international de 34 secondes.

et tolèrent une dérive du temps entre les différents composants, jusqu'à ce que l'horloge globale du réseau soit remise à l'heure par une synchronisation d'ensemble. Les secondes intercalaires n'ont pas d'incidence – ni en bien ni en mal – pour de telles applications.

En revanche, les secondes intercalaires peuvent poser des problèmes aux systèmes qui nécessitent une synchronisation précise, mais qui ne sont pas conçus pour les traiter. Dans certains systèmes informatiques répartis, le partage de données séquentielles par paquets pourrait par exemple être perturbé si des composants du réseau ignorent les secondes intercalaires.

Une partie du problème vient du système de notification. L'annonce officielle de l'ajout d'une seconde intercalaire est publiée dans le bulletin C de l'IERS. Les ingénieurs doivent ensuite traduire cette information en une forme compréhensible par les différents systèmes informatiques. Certains systèmes comme le GPS diffusent l'in-

formation sur les secondes intercalaires à venir peu après leur annonce, soit près de six mois avant leur application. Un récepteur GPS pourrait ainsi être la méthode la plus fiable et la plus pratique pour être informé de façon automatique des secondes intercalaires à venir. Cependant, le temps indiqué par le système GPS ne tient pas compte des secondes intercalaires et est actuellement en avance de 15 secondes sur l'UTC, ce qui complique certaines applications spatiales.

Plus de contraintes que d'avantages ?

L'Institut américain des étalons et de la technologie (le NIST) diffuse en ondes courtes les notifications de seconde intercalaire jusqu'à 30 jours à l'avance. Certains protocoles pour les dispositifs en réseaux n'avertissent qu'une minute à l'avance, ce qui peut se révéler trop tardif, par exemple si la mise à jour n'est pas automatisée.

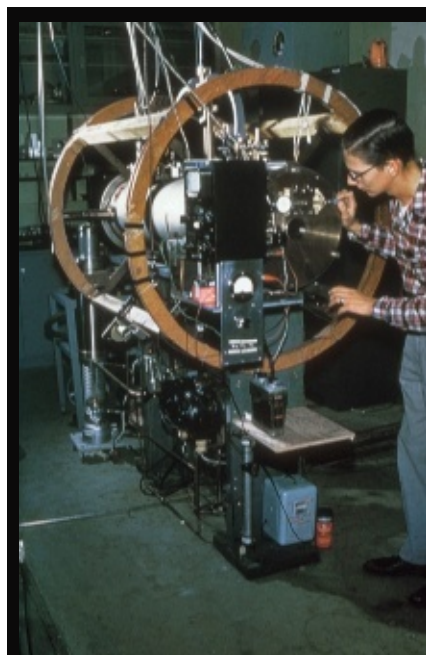
L'affichage des secondes intercalaires est un autre problème du Temps universel coordonné. Si les horloges analogiques ne peuvent pas s'adapter à une minute de 61 secondes, en théorie, les horloges numériques et les logiciels le peuvent. Utiliser une seconde intercalaire « négative » (pour passer de 23 : 59 : 58 à 00 : 00 : 00) serait encore plus simple. En pratique, le manque de matériel informatique et de circuits électroniques bon marché permettant de gérer l'ajout d'une seconde intercalaire – en affichant par exemple 23 : 59 : 60 – a conduit à des moyens très divers et peu conventionnels pour représenter l'UTC à l'approche d'une seconde intercalaire. Cela peut aussi poser des problèmes pour la synchronisation des horloges d'ordinateurs.

Quand l'UTC avec ses secondes intercalaires a été introduit, au début des années 1970, il apportait une commodité et des avantages certains pour l'industrie des télécommunications. Trente ans plus tard, les secondes intercalaires sont beaucoup moins appréciées, en raison des problèmes que nous venons d'évoquer. C'est pourquoi l'ITU-R a décidé en 2001 de réétudier cette question. Après réflexion, un groupe de recherche de cette institution a recommandé l'abandon des secondes intercalaires, tout en conservant l'appellation de Temps universel coordonné.

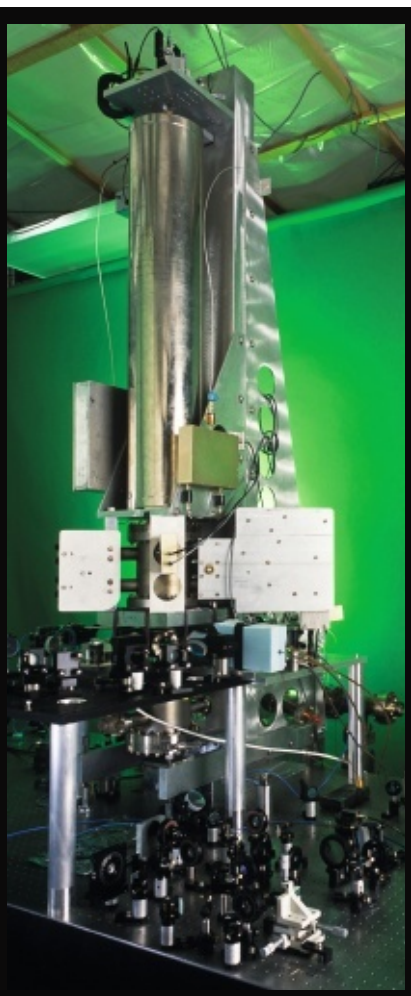
L'Assemblée des radiocommunications de l'ITU-R s'est réunie à Genève en janvier 2012 pour voter pour ou contre la suppression des secondes intercalaires d'ici 2018. À l'heure où ces lignes sont écrites, nous ignorons le résultat du vote. Mais si cette proposition était approuvée, le Temps universel coordonné cessera d'être synchronisé avec le Temps universel, c'est-à-dire avec le temps solaire, pour suivre une échelle parallèle au temps atomique.

Que se passera-t-il alors ? Le principal avantage de l'abrogation des secondes intercalaires serait que les systèmes qui n'exploitent pas le temps astronomique n'auront plus d'efforts à faire pour se tenir à jour, traiter et afficher ces secondes. Cela entraînerait une simplification notable pour les télécommunications et certains systèmes de navigation électroniques, tels le GPS.

En revanche, tous ceux qui travaillent avec des informations historiquement datées seront pénalisés. Par ailleurs, certaines missions spatiales et autres applications astronomiques devront prendre garde à distinguer le Temps universel coor-



5. LA PREMIÈRE MESURE ATOMIQUE du temps, via la fréquence d'un rayonnement du césium 133, a été réalisée en 1952 avec l'instrument NBS-1 (ci-dessus) du NIST, l'Institut américain des normes et de la technologie. L'étalon actuel du temps civil et des fréquences des États-Unis est mesuré avec une précision de une seconde pour 100 millions d'années par l'instrument NIST-f1 (à droite).



donné sans secondes intercalaires et le Temps universel.

L'abandon des secondes intercalaires perturberait aussi les horloges et les dispositifs de télécommunication où la gestion des secondes intercalaires est intégrée. Des changements statutaires et réglementaires seraient également nécessaires dans les législations nationales, pour lesquelles le temps astronomique est l'étalon explicite ou implicite.

À plus long terme, sans secondes intercalaires, l'écart entre l'UTC, calé sur le temps atomique, et l'UT1, fondé sur le rythme réel du jour et de la nuit, va continuer à croître. L'heure officielle et l'heure vraie indiquée par les mouvements du Soleil vont lentement se décaler. En poussant à l'extrême, si rien n'est fait, il sera un jour midi à minuit, et la date du jour changera en plein milieu de la journée!

Des ajustements encore plus conséquents que les secondes intercalaires, mais plus espacés – des minutes ou des heures intercalaires – seront ainsi indispensables. Il n'est pas *a priori* évident que ces ajustements soient plus faciles à mettre en œuvre que les secondes intercalaires.

Le ciel, gardien du temps

Certes, aucun système de décompte du temps ne peut durer indéfiniment. Même le calendrier grégorien nécessitera un jour des ajustements par l'ajout de jours intercalaires exceptionnels, ou cédera la place à un calendrier plus précis, car ses règles ne sont elles aussi que des approximations des relations astronomiques réelles.

De même, dans sa forme actuelle, le Temps universel coordonné ne fonctionnera plus dans un millier d'années : à cette époque, pour le synchroniser avec le Temps universel, il faudra plus de secondes intercalaires qu'il n'y a de mois où les ajouter ! En effet, si la durée du jour solaire a en moyenne raccourci ces dernières années en raison de phénomènes géophysiques internes à notre planète, sur le long terme, le jour solaire va s'accroître de quelques millisecondes chaque siècle, à cause des forces de marée exercées par la Lune. La durée actuelle du jour astronomique est d'environ 86 400,001 secondes. Nous avons donc besoin d'une seconde intercalaire tous les deux à trois ans. Dans 50 000 ans, le jour astronomique vaudra environ 86 401 secondes. Avec le système actuel,



6. LE TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL est établi par le Bureau international des poids et mesures (BIPM), situé à Sèvres, près de Paris, à partir des mesures de plus de 300 horloges atomiques réparties dans le monde entier (*points rouges*). L'insertion des secondes intercalaires pour maintenir le temps atomique à moins de 0,9 seconde du Temps universel, réglé sur la rotation de la Terre, est décidée par l'IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*), hébergé à l'Observatoire de Paris.

une seconde intercalaire serait alors nécessaire chaque jour !

Il est intéressant d'imaginer comment les générations futures s'adapteront à cette situation. Comme toute technologie, les horloges en disent beaucoup sur les civilisations. Mais le décompte du temps est un problème actuel et continuera à l'être durant les décennies et les siècles à venir. Nous aurons toujours besoin de distinguer la nuit du jour, de diviser nos journées en heures et de fixer la date des événements importants.

Il n'existe pas de consensus dans les milieux industriels et universitaires, ni dans les instances gouvernementales sur la modification du Temps universel coordonné et la suppression des secondes intercalaires. Mais si nous brisons le lien entre le temps et les cycles astronomiques, nous ne sommes pas certains de pouvoir le renouer un jour. Même si les secondes intercalaires étaient supprimées, le problème sous-jacent – comment concilier l'avance constante du temps atomique sur le temps astronomique – ne disparaîtra jamais. En outre, l'UTC reste la base légale du décompte du temps civil dans la plupart des pays ; c'est une convention qui ne devrait pas être modifiée par caprice. Les délibérations de l'ITU-R résoudront-elles ou amplifieront-elles ces problèmes ? Seul... le temps nous le dira. ■

✓ SUR LE WEB

Site de l'ITU :
<http://www.itu.int/home/>

Site du BIPM : <http://www.bipm.fr/>

Site de l'IERS :
<http://hpiers.obspm.fr/>

✓ BIBLIOGRAPHIE

D. Savoie, *Vers une nouvelle échelle de temps ?*, *Revue du Palais de la Découverte*, n° 377, novembre-décembre 2011.

D. Finkleman *et al.*, *The debate over UTC and leap seconds*, *AIAA Paper* 2010-8391, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010.

D. Savoie, *Dates, ères, styles et calendriers*, *Dossier Pour la Science* n° 42, janvier-mars 2004.
http://bit.ly/doss42_savoie

D. Savoie, *Les cadrans solaires*, Belin, 2003. <http://bit.ly/cadrans>

R. Nelson *et al.*, *The leap second : its history and possible future*, *Metrologia*, vol. 38, pp. 509-529, 2001.

J. Lefort, *La saga des calendriers*, Belin/Pour la Science, 1998.

L'ours spéléologue

Véritable musée de l'ours des cavernes, la grotte Chauvet nous permet de nous représenter cette espèce disparue et d'étudier son mode de vie ainsi que son génome.

Jean-Marc Elalouf et Valérie Féruglio

Il y a 40 000 ans, les premiers hommes modernes d'Europe vivaient dans un environnement très différent du nôtre. La calotte glaciaire de l'Arctique avait une extension considérable et les glaciers des Alpes parvenaient jusque vers Lyon, qui n'existait pas... La faune associée à ce climat froid comportait de nombreuses espèces éteintes. Certaines, comme le mammouth ou l'aurochs, ont survécu après la dernière période glaciaire qui s'est terminée il y a 10 000 ans, tandis que d'autres se sont éteintes avant ou vers la fin de cette période, tels l'hyène ou l'ours des cavernes (*Ursus spelaeus*).

Tout le monde a entendu parler de l'ours des cavernes, mais que savons-nous au juste de cet animal ? Il est possible aujourd'hui de profiter des collections du spectaculaire musée naturel dédié à *Ursus spelaeus* qu'est la grotte Chauvet pour dresser un bilan de nos connaissances sur cet ours préhistorique. Découverte il y a 18 ans en Ardèche, dans le Sud de la France, cette cavité contient au moins 4 000 ossements d'ours des cavernes, issus de 200 individus, et 13 représentations du géant disparu parmi 420 images animalières réalisées par des artistes préhistoriques.

1. L'OURS DES CAVERNES a disparu à la fin de la dernière période glaciaire, assez tard pour que les premiers hommes anatomiquement modernes d'Europe le rencontrent et le dessinent. Ses ossements, qui se sont accumulés par dizaines de milliers dans les grottes d'Europe, se prêtent à des analyses génétiques.

Les chercheurs qui étudient *Ursus spelaeus* disposent ainsi sur un même site de dessins de l'ours des cavernes réalisés il y a plusieurs dizaines de millénaires et d'os de cette même espèce contenant encore de l'ADN.

Aucun autre site connu ne recèle autant d'informations sur ce grand ours préhistorique. Comme nous allons le voir, l'histoire de l'ours des cavernes rappelle un peu celle de l'homme de Neandertal : cet homme robuste apparaît en Europe à peu près à la même époque que l'ours des cavernes, et disparaît aussi durant la dernière période glaciaire. Si l'on cherchait à résumer l'aventure terrestre de l'ours des cavernes dans un cadre chronologique humain, on pourrait, en forçant le trait, qualifier cet animal d'ours de Neandertal !

Une espèce éteinte

L'ours des cavernes était donc proche de son extinction lorsque des *Homo sapiens*, parmi les premiers d'Europe, l'ont représenté sur les parois de la grotte Chauvet. Ces artistes appartenaient à des groupes humains nomades ou semi-nomades, qui tiraient leurs moyens de subsistance de la chasse et de la cueillette.

Les sites d'occupation humaine nous permettent de savoir quels animaux étaient chassés et avec quels outils. Ces sites (abris sous roche, campements de plein air) renseignent ainsi sur la culture matérielle et le mode de vie des hommes préhistoriques. Les grottes, seulement occasionnellement occupées, montrent que l'interaction de l'homme avec l'animal ne se limitait pas à une relation prédateur-proie. Certains animaux, qui ne correspondaient pas forcément aux espèces chassées – et c'est le cas de l'ours des cavernes –, ont été représentés dans les grottes, au moyen de procédés divers et parfois très élaborés. Ces représentations picturales nous livrent quelques éléments de la vie spirituelle d'alors, sans doute aussi l'origine de mythes que les cultures successives ont peu à peu transformés. Et les représentations de l'ours des cavernes ont l'intérêt de fournir une inestimable information : le portrait d'une espèce éteinte.

Disparu durant la dernière période glaciaire à une date sur laquelle nous reviendrons, l'ours des cavernes est redécouvert et « naît » scientifiquement en 1794 grâce aux observations réalisées par Johann Christian Rosenmüller et Johann Chris-

tian Heinroth dans la grotte de Gailenreuth, en Allemagne. Bien que les ossements présents dans cette grotte aient d'abord été attribués à l'homme (!), puis à l'ours polaire, l'identification des os d'ours des cavernes ne présente pas vraiment de difficultés aux paléontologues. Le nom *Ursus spelaeus*, c'est-à-dire littéralement « ours des grottes », provient du fait que les premiers ossements ont été découverts en milieu souterrain, tout comme la quasi-totalité de ceux qui nous sont parvenus.

Plusieurs caractéristiques anatomiques différencient l'ours des cavernes des ours actuels, notamment de l'ours brun (*Ursus arctos*) qui était également présent en Europe durant le Paléolithique. Sa taille, en premier lieu, impressionne : la hauteur au garrot (distance du cou au sol pour un quadrupède) atteignait 1,20 mètre chez nombre d'individus et, dressé sur ses pattes arrière, l'animal pouvait étendre ses griffes à près de trois mètres de haut. La section transversale des os des membres, destinés à supporter le poids de l'animal, était nettement supérieure à celle observée chez l'ours brun. Cela suggère que la masse corporelle pouvait être le triple de celle d'un ours brun et avoisiner 500 kilogrammes chez le mâle.

La taille imposante du squelette et le caractère massif des os ne sont pas les seuls éléments permettant d'identifier l'ours des cavernes. Ils doivent d'ailleurs être relativisés, car la variabilité individuelle apparaît importante (certains sites livrent des individus « nains »), et les femelles étaient beaucoup plus graciles que les mâles. Nous sommes habitués à de telles variations au sein d'une espèce ou d'un sexe à l'autre. Il suffit de comparer, dans l'espèce humaine, un basketteur et un jockey, ou la stature d'un homme à celle d'une femme pour oublier les notions de poids ou taille moyens.

Heureusement, d'autres caractères morphologiques distinctifs sont présents chez l'ours des cavernes, et ceux qui sont susceptibles d'être traduits graphiquement méritent une attention particulière : ils aident à définir ce qui, dans l'art paléolithique, procède du naturalisme. Nous allons notamment porter notre attention sur la tête, car les dessins d'ours ne comportent parfois que cette partie de l'animal.

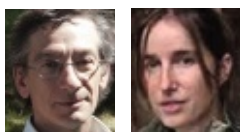
Le premier élément notable est le profil crânien. Contrairement à l'ours brun qui a un front fuyant, l'ours des cavernes a un stop frontal marqué, qui lui donne

L'ESSENTIEL

- ✓ L'ours des cavernes était une espèce d'Europe et d'Asie.
- ✓ Encore abondant il y a 30 000 ans, il disparaît il y a 25 000 à 15 000 ans selon les régions.
- ✓ La grotte Chauvet est le site idéal d'étude de ce grand animal, car elle renferme à la fois des représentations préhistoriques de cette espèce éteinte et de nombreux ossements.
- ✓ Inféodé aux grottes, où il hibernait, l'ours des cavernes était plus grand et plus végétarien que son lointain cousin l'ours brun.
- ✓ Les ours de la grotte Chauvet étaient des spécimens tardifs de l'espèce ; leur diversité génétique était faible.

Mickaël PÉTIQUET

LES AUTEURS



Jean-Marc ELALOUF, généticien, dirige l'équipe de paléogénétique de l'Institut de biologie et de technologies de Saclay, au CEA.

Valérie FÉRUGLIO, préhistorienne, est membre de l'équipe Archéologies et sciences de l'Antiquité, de la Maison de l'archéologie et de l'ethnologie à l'Université Paris Ouest Nanterre La Défense.

un profil en marche d'escalier (voir la figure 2c). La mandibule est également discriminante. Chez l'ours des cavernes, son bord inférieur, particulièrement arrondi, évoque une chaise à bascule. L'ouverture nasale est également remarquable, car elle est orientée vers le haut. Enfin, les orbites sont de dimension plus réduite que chez l'ours brun, ce qui suggère que l'œil était de petite taille.

Si l'on pense maintenant à l'animal couvert de poils, on conçoit aisément que l'œil était difficilement perceptible par l'observateur. Tous ces éléments (profil frontal en escalier, mandibule arrondie, ouverture nasale vers le haut, œil quasi invisible) concourent à établir que c'est bien l'ours des cavernes qui est représenté dans la grotte Chauvet. Lorsque la représentation est complète, le caractère massif des membres, et le rapport des antérieurs aux postérieurs qui confère un arrière-train bas, nous donnent une idée de l'allure générale de l'animal (voir les figures 2 et 4).

Les grottes contenant des ossements d'ours des cavernes (voir la figure 5) livrent

généralement peu d'autres vestiges de mammifères. Cette donnée, apparemment anecdotique, est significative à plus d'un titre. Tout d'abord, elle nous fait prendre conscience qu'en définitive peu d'animaux fréquentaient de façon régulière les grottes profondes. En deuxième lieu, elle met en évidence une répartition de l'espace souterrain entre les espèces : les grottes occupées par l'ours des cavernes contiennent peu d'indices de fréquentation par l'hyène des cavernes, et inversement.

Hibernation en grotte, pas dans une tanière

Enfin, la prédominance systématique dans les « grottes à ours » d'ossements d'ours des cavernes, par rapport à ceux d'ours brun, révèle une différence supplémentaire entre les deux espèces. L'observation des ours bruns actuels nous en donne la clef : au moment du sommeil hivernal, l'ours brun choisit une tanière qui consiste la plupart du temps en un trou à proximité d'un arbre mort. Il ne montre pas d'at-



2. LONGUE DE 500 MÈTRES ET LARGE D'ENVIRON 50, la grotte Chauvet contient plus de 400 œuvres pariétales qui figurent souvent des animaux dangereux, dont l'ours représenté 13 fois. Ci-dessus à gauche, la topographie de la grotte ainsi que la répartition des empreintes laissées

par des ours. Les représentations incluent deux ours noirs dessinés au charbon de bois (a, b), dont un marqué de griffades d'ours (a), deux ours rouges dessinés à l'ocre (c, d), un profil d'ours peu distinct (e) gravé sur une paroi meuble et un curieux ours tacheté (f).

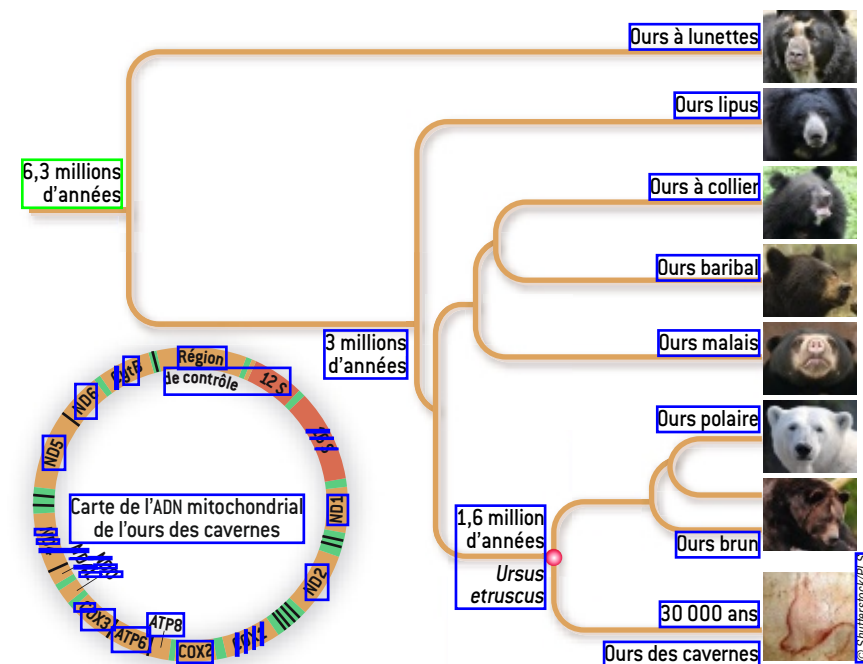
tirance particulière pour les grottes, au contraire de l'ours des cavernes qui les recherchait pour hiberner.

L'aire de répartition de l'ours des cavernes se trouve presque exclusivement sur le continent européen qui, aux périodes glaciaires, incluait les îles britanniques. Elle est à rechercher dans les régions calcaires, propices aux grottes, parfois à haute altitude. Des sites alpins à plus de 2000 mètres, accessibles durant les périodes interglaciaires, ont fourni les squelettes des individus nains évoqués précédemment.

Dans les grottes à ours, les indices de fréquentation sont nombreux et variés. Les os de plusieurs centaines, voire milliers, de spécimens sont présents. Les sols sont couverts d'empreintes et creusés de centaines de bauges qui ont servi de nid aux ours pour leur sommeil hivernal. Les parois portent d'innombrables traces de griffes et, par endroits, elles ont été polies par le passage répété des ours. Ce polissage reflète la fréquentation de la grotte par des générations d'animaux, et il a en partie effacé certains dessins de la grotte Chauvet.

Il n'y a pas, en revanche, de traces des proies du plantigrade. Cela ne saurait surprendre, car l'adaptation des ursidés à un régime végétarien est particulièrement marquée chez *Ursus spelaeus*. « Le moins carnivore des Carnivores et le plus ours des Ours », comme le décrivait le paléontologue français Albert Gaudry (1827-1908), n'a pas la mâchoire d'un carnassier, mais plutôt celle d'un omnivore, plus à même de broyer la paroi des végétaux que de déchiqueter la viande. La consommation préférentielle de végétaux a été validée par des analyses portant sur les isotopes stables du collagène des os. En particulier, la teneur en isotope lourd de l'azote (^{15}N) est plus proche des valeurs mesurées chez les herbivores que chez les animaux consommant régulièrement de la viande.

Notre description de la grotte type ne tient pas compte des contingences variées qui ont pu altérer un site occupé il y a plusieurs dizaines de milliers d'années. Dans certains cas, les ossements auront disparu, car les sols, trop acides, sont impropres à leur conservation (Dordogne). Ailleurs, les empreintes auront été effacées et les bauges détruites. Ces altérations peuvent être naturelles (ennoyage) ou liées aux activités humaines. Si la grotte est restée ouverte, des fréquentations humaines durant plusieurs siècles n'auront pas manqué de se produire et sont attestées par des



3. L'ARBRE PHYLOGÉNÉTIQUE DES URSIDÉS est mieux connu depuis que l'ADN mitochondrial de l'ours des cavernes a été entièrement séquencé. La comparaison de ce dernier avec l'ours brun a révélé l'importance de la différence génétique entre les deux espèces. En modélisant l'accumulation des mutations au cours du temps, on peut en déduire l'époque à laquelle les deux lignées évolutives ont divergé : il y a environ 1,6 million d'années.

graffitis aux périodes historiques (Arcy-sur-Cure, Niaux, Rouffignac).

Il existe aussi des perturbations plus agressives. Les sols sur lesquels se sont décomposés les cadavres d'ours des cavernes étant riches en phosphate, ils ont pu faire l'objet d'une exploitation industrielle. Ils ont aussi pu être remaniés lors des travaux de terrassement réalisés pour l'aménagement du site aux visites touristiques de masse (Lascaux). En définitive, il est rare de trouver réunis dans un même site tous les témoignages d'occupation ursine. Dans la grotte Chauvet, cependant, ils sont tous présents et permettent la confrontation du modèle et de sa restitution graphique par les hommes du Paléolithique supérieur, premiers et derniers *Homo sapiens* à l'avoir côtoyé. À Chauvet, nous sommes dans un autre registre que celui de la grotte type à ours des cavernes, le site ayant également été façonné par l'homme à son image (voir la figure 6).

L'une des principales questions que l'on se pose à propos de l'ours des cavernes est celle de son histoire évolutive et de sa parenté avec les autres espèces d'ours. L'analyse quantitative de la morphologie des os et des dents a longtemps été le seul moyen de déterminer les relations phylogéniques entre *Ursus spelaeus* et les autres

espèces d'ours. Très récemment, le séquençage de l'ADN contenu dans les ossements est venu compléter cette approche et a apporté de précieuses informations.

Un ancêtre commun avec l'ours brun

L'histoire des diverses espèces d'ours commence il y a quelque 30 millions d'années, mais ce sont surtout les trois derniers millions d'années qui nous intéressent (voir la figure 3). Les paléontologues ont alternativement fait de l'ours des cavernes un ancêtre de l'ours brun, un descendant des ours bruns primitifs ou, plus vraisemblablement, un membre d'une lignée présentant un ancêtre commun avec l'ours brun. Cet ancêtre commun, *Ursus etruscus*, était présent en Asie et en Europe. Ses fossiles jalonnent près de deux millions d'années d'histoire de l'ours, entre -3 et -1 millions d'années environ.

Apparu il y a près d'un million d'années, l'ours brun a connu un beau succès évolutif. Originaire d'Asie, il a en effet occupé l'Ancien et le Nouveau Monde et s'est diversifié en nombreuses lignées (lignées européennes, grizzly, kodiak...). Apparue il y a 150 000 ans, la plus récente d'entre elles correspond à l'ours polaire



MCC - CNP - PÉRIODEUX

4. CE DESSIN est l'une des représentations de l'ours des cavernes réalisées par les Aurignaciens, il y a plus de 30 000 ans en Ardèche. Elle montre le stop frontal caractéristique de ces animaux, ainsi que l'arrière-train plus bas par rapport aux épaules que chez l'ours brun. Les oreilles sont petites et rondes et la bosse de graisse, précieuse réserve d'hibernation, est visible au niveau des épaules. Les yeux, vraisemblablement très petits, ne sont pas représentés.



MCC - CNP - PÉRIODEUX

5. CET AMAS D'OS D'OURS DES CAVERNES trouvé dans la grotte Chauvet est un exemple de ceux que l'on trouve en abondance dans les grottes d'Europe. L'accumulation d'ossements s'explique par la mort, au cours de l'hibernation, d'animaux fragiles (ours âgés ou malades, oursons) ou qui n'avaient pu accumuler suffisamment de graisses pendant l'été. L'association de squelettes de femelles et de nouveau-nés suggère que la mise bas avait lieu durant l'hibernation.

(*Ursus maritimus*), le seul ours actuel qui ait un régime strictement carnivore. L'ours des cavernes apparaît plus tardivement que l'ours brun. La lignée spéléoïde comporte en particulier *Ursus deningeri*, qui précède l'ours des cavernes au sens strict. Ce dernier aura donc finalement eu une existence assez brève. Il apparaît il y a 300 000 ans en Europe, territoire qu'il ne quittera pratiquement pas, et disparaît à la fin de la dernière période glaciaire.

Son ADN mitochondrial a été séquencé

Le séquençage de l'ADN de l'ours des cavernes a progressé récemment grâce à la caractérisation complète de son génome mitochondrial. Ce génome circulaire (voir la figure 3) est le plus couramment analysé par les paléogénéticiens pour des raisons pratiques et théoriques. D'un point de vue expérimental, il est relativement facile à étudier, car il est compact (200 000 fois plus petit que le génome nucléaire), et surtout très abondant : une cellule animale peut contenir 1 000 exemplaires du génome mitochondrial, alors qu'elle ne possède que deux copies du génome nucléaire (une de chaque parent).

Cette abondance du génome mitochondrial est particulièrement intéressante pour les échantillons archéologiques, dont l'ADN est dégradé. On a ainsi 1 000 fois plus de chance de récupérer un génome mitochondrial qu'un génome nucléaire complet. Du point de vue théorique, l'intérêt de ce génome réside dans son évo-



6. DEUX PLANTIGRADES, dont un bipède (l'homme, a) et un quadrupède (l'ours des cavernes, b), ont pénétré dans la grotte Chauvet. L'ours venait pour hiberner. L'homme venait probablement en été, quand l'ours n'y était pas.

lution rapide (certaines de ses régions comportent des fragments hypervariables) et dans sa transmission exclusive par la lignée maternelle, qui facilite l'analyse des processus évolutifs.

Le premier génome mitochondrial d'ours des cavernes déposé dans la banque américaine de gènes en libre accès *GenBank* provient d'un spécimen de la grotte Chauvet. Sa comparaison avec le génome des ours actuels, dont l'ours polaire et plusieurs lignées d'ours bruns, montre que l'ours des cavernes appartient à une lignée distincte de celle des ours bruns.

Ces analyses génétiques montrent aussi que l'ours des cavernes est une espèce

apparue anciennement (voir la figure 3). À quelle époque ? Avec un génome mitochondrial complet, on dispose d'une séquence moléculaire suffisamment longue pour dater, au moyen de simulations informatiques, le moment où deux lignées s'engagent dans des voies évolutives distinctes. Ces simulations indiquent que les lignées de l'ours brun et de l'ours des cavernes ont divergé il y a 1 à 2,1 millions d'années, la valeur la plus probable étant 1,6 million d'années.

Les derniers spécimens connus d'*Ursus etruscus* ont 1,2 million d'années, tandis que les plus anciens ours bruns ont 900 000 ans. Dans l'état actuel des connaissances, *Ursus etruscus* peut donc prétendre au titre de dernier ancêtre commun à l'ours brun et à l'ours des cavernes.

Nous connaissons ainsi un peu mieux l'ours des cavernes et ses ancêtres et, grâce aux dessins de la grotte Chauvet, nous pouvons même nous l'imaginer de façon précise. On peut maintenant se demander quand il a disparu et pourquoi.

Les scientifiques ont noté depuis longtemps que l'ours des cavernes était encore abondant il y a 30 000 ans, puis qu'il s'est vite raréfié. Les opinions divergent sur la date d'extinction de l'espèce, les positions extrêmes situant cette extinction il y a 24 000 ans, ou tout à la fin de la dernière période glaciaire, il y a 10 000 ans. Examinons les informations livrées par la grotte Chauvet et comparons-les à celles obtenues dans une autre grotte des gorges de l'Ardèche, la grotte des Deux-Ouvertures, pour étendre notre analyse à

un cadre régional. L'ADN mitochondrial des ours des cavernes de ces deux sites présente une faible diversité génétique, limitée à deux lignées maternelles.

Cette constatation, déjà frappante, devient particulièrement informative lorsqu'on met en parallèle l'âge des échantillons étudiés. Il s'agit en effet dans les deux sites de spécimens tardifs de l'espèce, qui ont vécu il y a 27 000 à 32 000 ans (quelques spécimens plus anciens sont présents à Chauvet, mais ils ne contiennent plus d'ADN). Pour comprendre la signification de ces résultats, il faut introduire un niveau de comparaison supplémentaire : les sites contenant des spécimens plus anciens. Une telle analyse révèle par exemple pour la grotte de Pestera cu Oase (Roumanie), il y a 45 000 ans, une diversité génétique plus grande et une population de taille effective dix fois plus importante.

Les caractéristiques de la population ardéchoise d'ours des cavernes sont donc celles d'une espèce menacée, que l'on s'attend à voir disparaître prochainement.

Pourquoi a-t-il disparu ?

La grande quantité d'os d'ours des cavernes à Chauvet (200 individus) ne doit pas faire illusion. Il suffit d'un individu mort tous les 20 ans pendant 4 000 ans pour obtenir cette accumulation. Il est donc possible que l'ours des cavernes n'ait jamais été abondant en Ardèche pendant l'Aurignacien (culture matérielle de l'homme moderne en Europe, il y a 35 000 à 28 000 ans environ) et qu'il ait disparu de la région peu après.

De fait, il est aujourd'hui assez clair que, après avoir été dessiné dans la grotte Chauvet, l'ours des cavernes est devenu trop rare pour être observé attentivement par les artistes du Paléolithique. Lorsqu'ils sont venus dans la grotte Chauvet il y a 25 000 à 27 000 ans, les porteurs de la culture gravettienne (la culture matérielle qui succède à l'Aurignacien, il y a 30 000 à 24 000 ans) ont fréquenté les mêmes secteurs que leurs prédécesseurs, notamment le diverticule où sont représentés des ours. Ils ont donc vu le portrait d'un animal peint plusieurs milliers d'années auparavant par les Aurignaciens. L'ont-ils considéré comme un portrait peu représentatif de l'ours brun, ou se sont-ils posé des questions sur la permanence des espèces ? Quoi qu'il en soit, leur art n'a plus fourni de représentations

naturalistes de l'ours des cavernes comparables à celles des Aurignaciens, ou bien c'est un autre animal, l'ours brun, qui a été dessiné (voir la figure 7).

L'homme moderne a-t-il joué un rôle dans la disparition d'*Ursus spelaeus* ? Nous manquons d'arguments pour l'affirmer. La chasse à l'ours des cavernes ne semble jamais avoir été intensive, tandis que la compétition avec l'homme pour les espaces souterrains, possible pour un seul site, n'est guère plausible à l'échelle d'une région aussi riche en cavités que l'Ardèche. Le déclin des populations d'ours des cavernes semble en outre avoir commencé avant l'arrivée d'*Homo sapiens* en Europe.

La fragmentation de la population d'*Ursus spelaeus* en groupes d'effectifs limités, isolés géographiquement, a pu conduire à des phénomènes de consanguinité, contribuer à l'accroissement des pathologies et précipiter l'extinction. On peut aussi se demander si l'ours des cavernes n'a pas été en partie victime de son mode de vie. L'absence d'exposition au soleil plusieurs mois consécutifs contribue au rachitisme, et l'hibernation exige des réserves de graisse suffisantes. Durant les semaines précédant l'hibernation, l'ours des cavernes avait ainsi besoin d'accéder à une alimentation carnée qui, peut-être, manquait parfois.

Pour tester cette idée, une piste consiste à étudier l'alimentation de carnivores tels que le loup et l'hyène des cavernes, qui ont laissé des excréments fossiles. L'ADN contenu dans ces vestiges devrait permettre d'identifier les proies les plus accessibles, et de mieux comprendre pourquoi l'ours des cavernes a disparu.

BIBLIOGRAPHIE

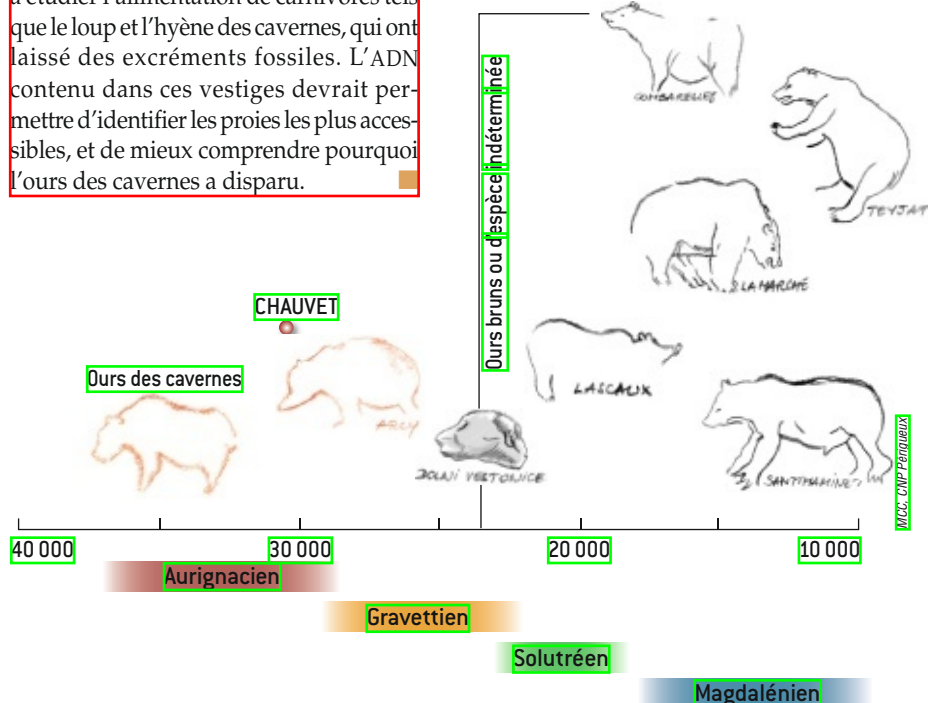
J. Clottes (sous la dir. de), *La Grotte Chauvet. L'art des origines*, Seuil, 2010.

C. Bon et al., *Deciphering the complete mitochondrial genome and phylogeny of the extinct cave bear in the Paleolithic painted cave of Chauvet*, *PNAS*, vol. 105, pp. 17447-17452, 2008.

C. Bon et al., *Low regional diversity of late cave bears mitochondrial DNA at the time of Chauvet Aurignacian paintings*, *J. Archaeol. Sci.*, vol. 38, pp. 1886-1895, 2011.

J. Jaubert, *Préhistoires de France*, Confluences, 2011.

J. Clottes, *Pourquoi l'art préhistorique ?*, Gallimard, 2011.



7. CETTE FRISE CHRONOLOGIQUE suggère qu'après le Gravettien, les hommes préhistoriques ne représentaient plus clairement l'ours des cavernes, mais soit des ours bruns (Les Combarelles, La Marche, Teujat, Lascaux, Santimamiñe), soit des ours d'espèce non identifiable (Dolni Vestonice).

Les isolants de Mott, des conducteurs bloqués

Antonio Tejeda et Arantzazu Mascaraque

Certains conducteurs électriques deviennent isolants quand on modifie la pression ou la température. Les physiciens tentent de mieux comprendre ce phénomène en l'étudiant sur des matériaux bidimensionnels.

Les alchimistes voulaient changer le plomb en or, mais cela s'est révélé être une chimère. Il est toutefois possible de changer certains conducteurs électriques en isolants, ce qui est en fait aussi étonnant que le grand œuvre des alchimistes...

Ces conducteurs, des métaux qui se muent en isolants quand on baisse la pression ou la température, alors qu'ils devraient, selon les critères théoriques usuels, rester conducteurs, sont nommés isolants de Mott. Le changement qui fait passer ces matériaux de l'état de conducteur à celui d'isolant et *vice versa* est ce que les physiciens nomment une transition de phase. Comment ont débuté et progressé les recherches sur la transition métal-isolant ? Où en est-elle aujourd'hui ? C'est ce que nous allons examiner ici. Nous verrons en particulier que les physiciens étudient actuellement une classe d'isolants de Mott où la transition ne concerne que la surface du matériau et dont les détails sont accessibles à l'analyse expérimentale et théorique. C'est dans un tel système, une surface de germanium recouverte d'une monocouche ordonnée d'atomes d'étain, que nous avons découvert en 2006 une transition métal-isolant, liée à l'évolution de la répartition des atomes d'étain avec la température.

L'ESSENTIEL

✓ Les isolants de Mott passent de l'état conducteur à celui d'isolant quand on change la température ou la pression.

✓ L'état isolant de ces matériaux s'explique en tenant compte des interactions des électrons dans le réseau cristallin.

✓ Comme l'indiquent des études en deux dimensions, la transition conducteur-isolant est liée à une modification de la structure cristalline du matériau.

Albert Mascaraque/Investigacion y Ciencia

Les isolants de Mott sont une anomalie parmi les matériaux conducteurs, isolants ou semi-conducteurs. Pour bien saisir pourquoi, évoquons d'abord les principes de construction de ce pan si important de la physique des solides du XX^e siècle qu'est la « théorie des bandes », et soulignons lequel se révèle faux dans le cas des isolants de Mott.

Initialement, la théorie des bandes a été développée pour décrire les conducteurs métalliques. Dans ces matériaux, la fonction décrivant l'état quantique d'un électron mobile – la « fonction d'onde » ou l'« orbitale électronique » de cet électron – est délocalisée. Cela signifie que l'espace où peut se trouver un tel électron de conduction s'étend à tout le matériau : il n'est pas attaché à un atome particulier. En outre, dans un tel conducteur, la superposition des orbitales a pour résultat que les énergies possibles pour les électrons sont réparties en bandes permises, séparées par des bandes interdites. Ainsi, les électrons délocalisés ont non seulement leurs énergies dans la bande de conduction (la bande permise la plus haute dans l'échelle des énergies), mais ils sont aussi partagés entre un grand nombre des atomes du matériau.

La théorie des bandes a toute une histoire qui s'achève en 1928 avec la contribu-

tion majeure du physicien suisse Félix Bloch (1905-1983). C'est lui qui a introduit l'idée que les électrons d'un matériau cristallin (un métal par exemple) sont soumis à une énergie potentielle périodique, due au motif répétitif de la structure atomique d'un cristal. Bloch a montré que la périodicité des orbitales atomiques crée la structure en bandes d'énergies permises et interdites.

De même que l'on monte un escalier en commençant par le bas, les électrons remplissent les bandes permises à partir de la plus petite énergie, car chaque orbitale ne peut contenir que deux électrons. Dans un métal non excité, l'énergie maximale des électrons est égale au « niveau de Fermi », un paramètre qui dépend du matériau et de la température. Les électrons dont l'énergie a une valeur proche du niveau de Fermi peuvent accéder, moyennant un apport d'énergie (grâce à un champ électrique par exemple), aussi petit soit-il, à des niveaux inoccupés. Ces électrons se déplacent alors dans le matériau pratiquement comme s'ils y étaient libres, sans interagir avec les autres électrons : c'est pourquoi la théorie de Bloch porte le nom de modèle des électrons quasi libres.

Quand la théorie des bandes montre ses limites

Le niveau de Fermi, défini ci-dessus pour des métaux, est un paramètre que l'on peut aussi définir pour les isolants. Selon la théorie des bandes, la position du niveau de Fermi détermine la nature conductrice ou non du matériau. Si le niveau de Fermi se trouve au milieu d'une bande d'énergies permises, le matériau est un métal. Quand, au contraire, il se trouve dans une bande interdite, au-dessus de la dernière bande permise complètement occupée, le matériau est un isolant : aucun électron n'acquiert, sous l'influence d'un champ électrique ordinaire, assez d'énergie pour atteindre un niveau permis et ainsi se déplacer librement.

La théorie des bandes explique le comportement des conducteurs métalliques et des isolants, mais est-elle toujours valable ? Dès 1937, les physiciens néerlandais Jan De Boer et Evert Verwey ont remarqué que l'oxyde de nickel et d'autres métaux de transition sont de mauvais conducteurs de l'électricité, alors qu'ils ont des bandes d'énergie *a priori* partiellement

occupées. La théorie des bandes, pourtant si efficace, semblait contredite, ce qui a fasciné les physiciens et amorcé le développement d'une nouvelle théorie.

C'est le Britannique Nevill Mott (1905-1996) qui expliquera l'échec de la théorie des bandes en décrivant le comportement de ces isolants, qui porteront plus tard son nom. La théorie des bandes est en effet fondée sur l'idée que les interactions entre électrons sont négligeables. Or ce pré-supposé perd sa validité pour certains matériaux et dans certaines circonstances.

Bande de conduction dédoublée

Comme les électrons sont tous de même charge négative, leurs interactions sont des forces électrostatiques de répulsion telles que les décrit la loi de Coulomb, c'est-à-dire inversement proportionnelles au carré de leur distance. Aussi Mott a-t-il remarqué que, dans leurs déplacements d'un atome à l'autre, deux électrons peuvent se retrouver sur la même orbitale et y exercer une répulsion mutuelle. Il supposa que dans les matériaux censés être des conducteurs selon la théorie des bandes, mais qui ne le sont pas, cet effet doit être important.

Plus précisément, imaginons d'abord que chaque atome héberge deux électrons dans la bande de conduction. Quand leur énergie cinétique est faible, ces électrons sont peu mobiles et peuvent donc rester longtemps liés au même atome. Toutefois, en raison de la force de répulsion qu'ils exercent l'un sur l'autre, ils tendent à s'éloigner.

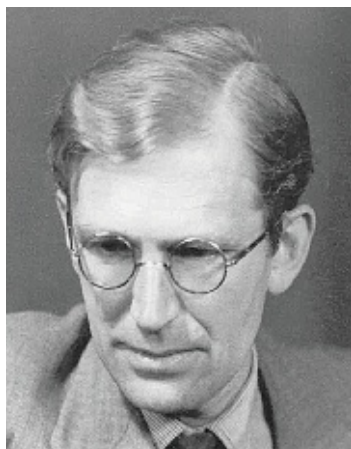
Ce phénomène se traduit de façon collective par un dédoublement de la bande de conduction en deux bandes séparées. Ce dédoublement correspond au remplacement de chaque état d'énergie initial, capable d'héberger deux électrons de spins différents, par deux états distincts d'énergies différentes, chacun capable d'héberger l'un des deux électrons. Cela peut créer une bande d'énergie inférieure complètement saturée en électrons, et une bande d'énergie supérieure inoccupée.

En d'autres termes, le niveau de Fermi se retrouvant dans une bande interdite entre la bande permise inférieure et la

1. ISOLANT OU CONDUCTEUR ? La compréhension des propriétés électroniques de certains matériaux est un défi pour les physiciens.

Sir Nevill Mott

✓ Né à Leeds en 1905, Nevill Mott, devenu professeur de physique théorique à l'Université de Bristol, puis directeur de l'Institut Cavendish à Cambridge, s'est consacré toute sa vie à appliquer la théorie quantique aux solides, publiant son premier article en 1927 et son dernier en 1996, l'année de sa mort. Son nom est associé à de nombreux concepts de la physique moderne.



PHYSICS PORTAIT GALLERY UNIV. OF BRISTOL

bande supérieure, aucun électron ne peut profiter des orbitales vides voisines pour quitter son atome et permettre la conduction électrique. Le matériau, qui selon la théorie des bandes (quand on néglige les interactions des électrons) devrait être conducteur, est en réalité isolant.

Puisque les métaux existent, tous les matériaux ne subissent pas ce processus, mais certains tendent plus que d'autres à passer de conducteur en isolant. Quels sont les effets qui conduisent à la transition métal-isolant ?

Mott a identifié que la pression exercée sur le matériau était l'un de ces effets. Plus précisément, si l'on suppose un matériau métallique au sein duquel des électrons de conduction sont quasi libres, son étirement, c'est-à-dire l'application d'une pression négative, écarte les atomes. Au-delà d'un certain étirement, les électrons ne peuvent plus passer facilement d'un atome à l'autre. Ils perdent leur mobilité et cessent d'interagir avec leurs semblables ; le système ressemble alors à un ensemble d'atomes isolés où chaque électron est localisé autour d'un atome, situation où le matériau est isolant.

Une autre façon simple de modifier l'interaction électronique est de diminuer la température. À très basse température, chaque électron localisé près d'un ion dispose de si peu d'énergie que la simple présence d'un autre électron sur un atome voisin suffit à le repousser et donc à le confiner sur son atome. Comme les pressions négatives, l'abaissement de la température peut donc transformer certains matériaux en isolants. C'est précisément ce que nous avons observé sur un système constitué d'étain déposé sur un substrat de germanium.

Si le principe de la transition métal-isolant a été éclairé par les travaux de Mott, bien des questions restent aujourd'hui ouvertes sur le magnétisme du matériau ou sur les états métalliques anormaux qui se créent lors de cette transition. Par

ailleurs, l'intérêt pour les isolants de Mott s'est renouvelé depuis la découverte en 1986 par Georg Bednorz et Alex Müller, du Laboratoire de recherche d'IBM à Zurich, d'une famille de composés qui restent supraconducteurs à température relativement élevée, parfois supérieure à celle de l'ébullition de l'azote liquide. Il s'agit de céramiques, c'est-à-dire des substances non organiques et non métalliques, cristallines ou vitrifiées. Or la plupart des physiciens pensent que la supraconductivité à haute température et la transition métal-isolant sont des phénomènes liés. La proximité entre les deux types de matériaux s'observe par exemple sur leurs « diagrammes de phase », graphiques qui indiquent les états macroscopiques du système en fonction de certaines variables (la température par exemple). L'étude de la transition métal-isolant éclairera donc peut-être le mécanisme complexe de la supraconductivité à haute température.

La photoémission à haute résolution : une nouvelle technique

Une puissante méthode – la photoémission à haute résolution – facilite aujourd'hui l'étude expérimentale des isolants de Mott. Cette technique consiste à provoquer grâce à une illumination assez intense un fort effet photoélectrique, puis à recueillir et à analyser, en énergie et en angle, le flux d'électrons produits. À ces possibilités expérimentales s'ajoutent de nouvelles approches théoriques (théorie du « champ moyen dynamique ») qu'ont développées Antoine Georges, de l'École polytechnique près de Paris, et Gabriel Kotliar, de l'Université Rutgers dans le New Jersey.

C'est dans cette mouvance que s'inscrit notre travail sur l'observation en surface de la transition métal-isolant. Pourquoi avoir choisi d'étudier les isolants de Mott à deux

2. LE SYNCHROTRON SLS, de l'Institut Paul Scherrer, près de Zurich, en Suisse, est l'instrument avec lequel les auteurs ont réalisé leurs expériences de photoémission à haute résolution.



WIKIMEDIA COMMONS/AFB

DES MÉTAUX QUI N'EN SONT PAS

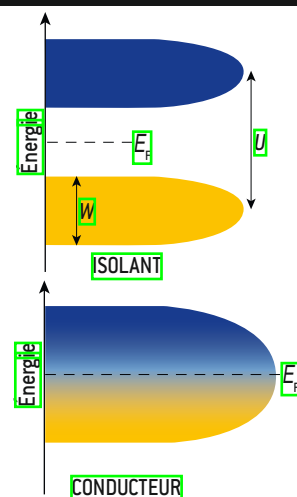
La conductivité d'un matériau, c'est-à-dire son aptitude à laisser passer les charges électriques, est déterminée par la structure de ses bandes d'énergies électroniques et par la position de son niveau de Fermi E_F . Les niveaux électroniques non occupés de plus basse énergie forment la bande de conduction (en bleu); les niveaux occupés de plus haute énergie forment la bande de valence (en orange). Dans les conducteurs, par exemple dans les métaux, le niveau de Fermi se trouve dans une bande permise, où il constitue le plus haut niveau d'énergie occupé:

les bandes de conduction et de valence se rejoignent. Dans les isolants, en revanche, le niveau de Fermi se situe dans une bande interdite. L'écart d'énergie correspondant empêche le passage des électrons vers la bande de conduction.

Dans certaines circonstances, la conductivité est altérée par la répulsion mutuelle des électrons. Certains matériaux, qui devraient être des métaux (car leur dernière bande est partiellement occupée), se comportent comme des isolants parce que l'énergie qui y est nécessaire pour vaincre la répulsion entre élec-

trons (U) se révèle supérieure à la largeur de la bande (W). Ainsi, les interactions entre électrons dans ces matériaux ont pour effet de doubler la bande à moitié remplie en deux bandes séparées par un saut d'énergie U , l'une, la bande inférieure, complètement remplie et l'autre, la bande supérieure, complètement vide.

Ces matériaux, qui se comporteraient comme des conducteurs si les interactions entre les électrons ne les obligeaient pas à se changer en isolants, sont ce que l'on nomme des isolants de Mott.



dimensions? Lorsque deux électrons se déplacent librement dans les trois directions de l'espace, leur répulsion électrostatique peut *a priori* les envoyer dans toutes les directions, de sorte qu'ils sont difficiles à localiser. Or, comme nous le verrons plus loin, les orbitales atomiques nécessaires pour former un isolant de Mott n'apparaissent que dans les systèmes où la localisation des électrons est relativement facile. Il aurait donc été dommage de ne pas profiter de cet avantage et de ne pas exploiter toutes les techniques de la physique de surface pour étudier précisément les isolants de Mott à seulement deux dimensions.

Soulignons toutefois que les systèmes physiques bidimensionnels ont souvent des propriétés très différentes de celles des systèmes tridimensionnels. Cela se manifeste dans bien des situations: par exemple, un matériau qui est magnétique à trois dimensions ne l'est plus forcément lorsqu'il est à l'état de couche mince.

Qu'est-ce qui change dans la pratique lorsqu'on étudie un phénomène électronique en surface? Pour que le système atteigne une énergie et une réactivité minimales, les positions atomiques – et les orbitales électroniques associées – tendent à se modifier par rapport à celles qui existent en volume. En surface, en raison de la disparition d'une partie des forces interatomiques, les atomes de la couche externe d'un cristal sont en effet susceptibles de se réorganiser. Ces réarrangements de surface sont qualifiés de «reconstructions».

De même que le cristal est caractérisé par une maille volumique, un motif tridi-

mensionnel d'atomes qui, répété dans toutes les directions, reproduit tout le cristal, une surface cristalline est caractérisée par une maille surfacique. On caractérise les reconstructions par deux nombres x et y , qui déterminent la partie de la surface à répéter par rapport à la maille volumique du cristal. Ces deux nombres, présentés sous la forme $(x \times y)$, sont éventuellement suivis par la donnée de l'orientation de la reconstruction (de la maille surfacique) par rapport aux directions principales des couches profondes, précédée de la lettre R. Par exemple, la reconstruction $(\sqrt{3} \times \sqrt{3}) R 30^\circ$ décrit une réorganisation de la monocouche de surface aboutissant à un motif dont les deux faces ont une longueur égale à $\sqrt{3}$ fois la longueur d'une face de la maille volumique et qui est en outre tourné de 30 degrés par rapport aux mailles des couches profondes.

Isolant de Mott à deux dimensions

Pour réaliser un isolant de Mott à deux dimensions, les surfaces semi-conductrices étaient les meilleures candidates, car leurs bandes d'énergie électronique sont étroites. Les électrons y sont pour cette raison assez localisés, de sorte que l'on peut s'attendre à ce que la répulsion coulombienne ait un effet important. Les expériences portant sur des surfaces ont débuté dans les années 1990, mais jusqu'en 2006, les seules surfaces identifiées comme isolants de Mott étaient une variété de carbure de silicium (SiC) ou le silicium lui-même. Dans ce dernier cas, il faut modifier

le nombre d'électrons de surface par dopage (addition) simultané de bore et de potassium, ce qui produit une bande de conduction à moitié remplie.

En 1997, Hanno Weitering, de l'Université du Tennessee à Knoxville, aux États-Unis, a étudié avec ses collègues une reconstruction $(\sqrt{3} \times \sqrt{3}) R 30^\circ$ réalisée à partir d'une couche mince de potassium déposée sur du silicium dopé avec du bore. Une telle surface plate a une maille surfacique ne comportant qu'un seul électron disponible. L'un des résultats de la théorie des bandes est que si le nombre total d'électrons dans la maille est impair, alors la bande de conduction est à moitié remplie, de sorte que le solide est un conducteur métallique. La détermination expérimentale des états électroniques par photoémission à haute résolution a cependant montré que le système de H. Weitering ne se comportait pas comme un conducteur.

La photoémission à haute résolution peut être inversée en envoyant des électrons sur le matériau, puis en détectant cette fois les photons émis, ce qui permet d'étudier les états électroniques vides du système (que les électrons incidents remplissent en émettant des photons). En procédant ainsi, H. Weitering a pu conclure que son système à reconstruction $(\sqrt{3} \times \sqrt{3}) R 30^\circ$ est un isolant de Mott, même si son équipe n'a pu observer directement la transition métal-isolant.

À la même époque, Leif Johansson de l'Université de Linköping, en Suède, Jean-Marc Themlin, à Marseille, et leurs collègues travaillaient pour leur part sur

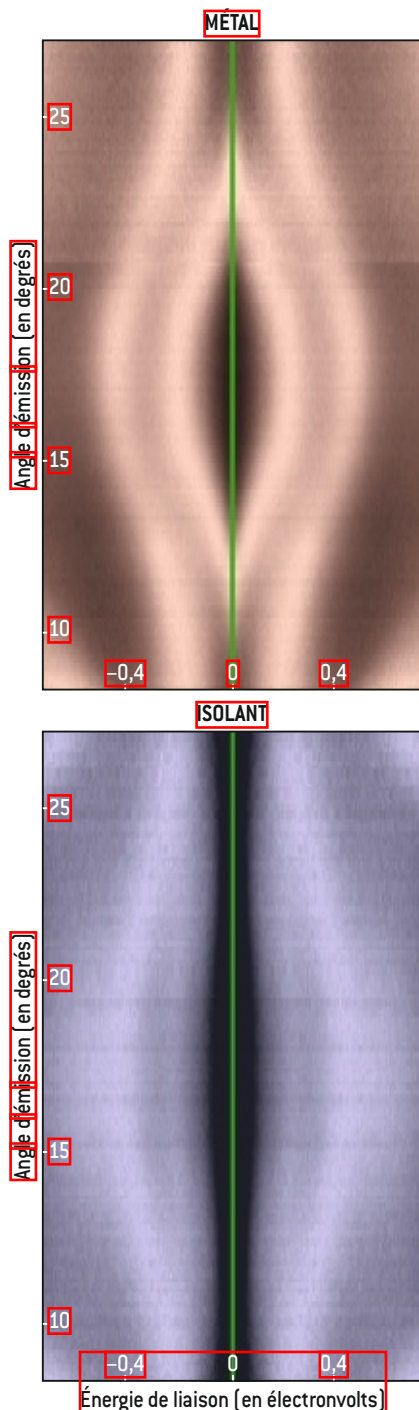
une surface de structure pratiquement identique, sauf que le substrat était en carbure de silicium au lieu d'être en silicium. Là encore, on s'attendait à ce que la reconstruction de surface soit métallique, mais elle s'est à nouveau révélée isolante. Une fois de plus, la transition métal-isolant n'avait pu être observée directement, ce qui n'a rien d'étonnant. En effet, les structures en potassium sur silicium de H. Weiering ou en carbure de silicium de L. Johansson et J.-M. Themlin se trouvent être des isolants de Mott très stables qu'il est difficile de transformer en conducteurs métalliques par chauffage, l'augmentation de température modifiant trop leur surface.

La transition observée sur une monocouche d'étain

Ainsi, la découverte à la fin des années 1990 d'isolants de Mott bidimensionnels fondait l'espoir de pouvoir observer directement la façon dont se déroule la transition de phase métal-isolant (en deux dimensions). À peu près au même moment, on a spéculé sur l'existence d'un état fondamental isolant de Mott dans le cas d'une couche mince d'étain sur germanium, mais sans en obtenir de preuve expérimentale.

En 2001, Fernando Flores, de l'Université autonome de Madrid, a montré par le calcul la stabilité de la reconstruction de surface (3×3) d'étain sur le germanium (existante) ainsi que celle d'une reconstruction ($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$) R 30° également d'étain sur germanium, qui n'était alors qu'hypothétique.

Stimulée par ces travaux, notre collaboration franco-espagnole a enfin pu observer, pour la première fois, une transition métal-isolant sur une monocouche d'étain déposée sur du germanium, constituée d'un atome d'étain pour trois de germanium. En 2006, dans l'équipe de Daniel Malterre, à l'Université de Nancy, nous avons fait varier sous un vide poussé la température de ce système entre celle de l'ébullition de l'hélium liquide (4 kelvins, ou -269°C) et la température ambiante. Par microscopie à effet tunnel, nous avons suivi les reconstructions de surface en fonction de la température alors que se déroulait la transition métal-isolant (voir la figure 4).



3. LA PHOTOÉMISSION à haute résolution livre ici la structure de bande du système étain sur germanium des auteurs et la façon dont elle change avec la température. Les énergies et les angles des électrons libérés sont en effet caractéristiques de leurs états initiaux, ce qui permet de visualiser les énergies des électrons superficiels en fonction de leur quantité de mouvement, laquelle détermine leur angle d'émission. Ainsi, vers 140 kelvins (*en haut*), on note une bande d'énergie (zone brillante) qui englobe le niveau de Fermi (ligne verte) : le matériau se comporte comme un métal. Vers 12 kelvins (*en bas*), la bande qui recouvrait le niveau de Fermi a disparu : le matériau se comporte comme un isolant.

Ce changement d'état se révèle être le résultat d'une évolution de la structure cristalline de surface avec la température. Entre 150 et 50 kelvins, on a une reconstruction de surface (3×3) comportant trois atomes d'étain par maille, l'un d'eux étant plus haut que les deux autres. Toutefois, quand la température diminue vers 30 kelvins, les atomes d'étain se redispent tous dans le même plan, de sorte qu'apparaît une reconstruction de surface ($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$) R 30° ne comportant plus qu'un seul atome d'étain (voir l'encadré page ci-contre). Nous avons étudié cette surface par photoémission au synchrotron SLS (Source de lumière suisse), près de Zurich (voir la figure 2), et montré qu'elle se comporte comme un métal.

Nous avons ainsi réussi à observer l'évolution de la région du niveau de Fermi avec la température (voir la figure 3). Au-dessus de 30 kelvins, la dernière bande n'est que partiellement occupée et contient le niveau de Fermi, ce qui est typique d'un matériau métallique. Lorsque la température diminue, cette bande se retrouve bien au-dessous du niveau de Fermi, ce qui est caractéristique d'un isolant. Comme le nombre d'électrons ne change pas avec la température, la seule conclusion possible était que notre système avait bien subi une transition métal-isolant, la première jamais observée directement en surface.

Pour autant, nous ne pouvions en conclure avoir réussi à obtenir un isolant de Mott en surface. Trois types de transition métal-isolant différents existent en effet : les transitions d'Anderson, de Peierls et de Mott. La transition d'Anderson est due au désordre : les défauts peuvent piéger les électrons et empêcher leur mouvement, ce qui rend isolant un système initialement métallique. La transition de notre système n'était pas une transition d'Anderson, car les images par microscopie à effet tunnel montraient que les défauts ne jouent aucun rôle actif.

Dans la transition de Peierls, le réseau cristallin se déforme et subit une distorsion géométrique de sa périodicité, qui diminue l'énergie du système. On sait par ailleurs que cette distorsion résulte de l'immobilisation d'une onde de densité de charge électronique et, dans une telle situation, la taille de la maille surfacique est plus grande à basse température qu'à haute température. Or c'est l'inverse

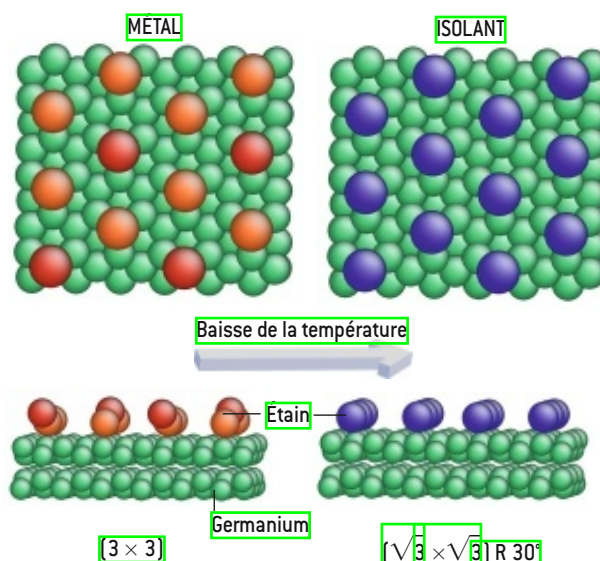
UNE TRANSITION DE PHASE LIÉE À LA STRUCTURE DU MATÉRIAU

La structure cristalline d'un matériau a une grande influence sur ses propriétés électroniques, car une modification de la géométrie du réseau peut affecter directement la structure des bandes. Ce couplage entre la structure cristalline et la structure de bande s'observe par exemple dans le cas du système constitué d'une monocouche d'étain (en rouge ou en bleu) déposée sur un substrat de germanium (en vert) lorsque la température diminue.

On constate en effet que l'arrangement, ou « reconstruction », noté (3×3) caractérise le système pour les hautes températures et en fait un conducteur. La

maille du réseau atomique de cette reconstruction comprend donc trois atomes d'étain, dont deux sont à la même hauteur et le troisième est surélevé (ci-contre à gauche).

Quand la température diminue, le réseau cristallin se réorganise toutefois et adopte la reconstruction $(\sqrt{3} \times \sqrt{3}) R 30^\circ$, qui en fait un isolant (ci-contre à droite). La maille de cette reconstruction ne comprend qu'un seul atome d'étain, et tous les atomes d'étain sont désormais disposés sur le même plan. Dans cette géométrie, les interactions entre électrons deviennent trop fortes pour pouvoir être vaincues avec l'énergie cinétique des électrons, qui ne circulent plus.



A. Mascaraque et A. Tejeda

dans notre système : la reconstruction (3×3) de la phase à haute température est plus grande que la reconstruction $(\sqrt{3} \times \sqrt{3}) R 30^\circ$ adoptée par le système à basse température. La transition que nous avons observée n'étant ni celle d'Anderson ni celle de Peierls, il s'agit bien d'une transition de Mott.

Notre découverte, c'est-à-dire la certitude de l'existence d'une transition de Mott en surface, a été suivie de nombreux travaux sur ce thème. Ainsi, Gianni Profeta et ses collègues et Erio Tosatti, de l'École internationale de Trieste (SISSA), en Italie, ont confirmé par des calculs l'existence d'un état fondamental isolant de Mott pour des systèmes étain sur germanium ou étain sur silicium, qui seraient en plus antiferromagnétiques. Cela signifie que dans ces systèmes, les spins des atomes voisins tendent à s'aligner, mais avec des orientations opposées, au contraire de ce qui est le cas dans les milieux ferromagnétiques. Ces chercheurs proposent que l'augmentation du désordre dans le système (mesuré par l'entropie) est le moteur de la transition métal-isolant.

En 2007, Silvio Modesti et ses collègues, du Laboratoire national pour les technologies avancées et les nanosciences à Trieste, en Italie, ont observé l'état isolant de Mott pour le système étain sur silicium. La structure se révèle semblable à celle du système étain sur germanium,

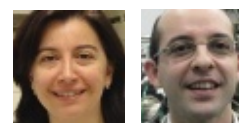
de sorte que la théorie des bandes en fait aussi un système métallique. La photoémission à haute résolution et la spectroscopie locale par microscope à effet tunnel montrent au contraire que ce système présente une transition de Mott et devient isolant au-dessous de 150 kelvins.

Le mécanisme exact de la transition reste à élucider

Tous ces exemples d'isolants de Mott suggèrent qu'un mécanisme général de transition de Mott en surface existe, et qu'il est susceptible de se déclencher aussi sur d'autres surfaces obtenues par dépôt d'une couche métallique sur un substrat semi-conducteur. À ce propos, des études de 2008 et 2009 de Harumo Morikawa, à Séoul, de Stefano Colonna, à Rome, et de leurs collègues confirment la présence d'états peu conducteurs dans les systèmes étain sur germanium à basse température. Cela renforce l'impression que les systèmes à base d'étain sur germanium et étain sur silicium constituent une sorte de prototype de matériau à transition de Mott.

Vers où tout cela mène-t-il ? Si nous disposons grâce à ces avancées d'une classe de systèmes d'étude de la transition de Mott, il reste à élucider son mécanisme exact. Nous élaborons actuellement un modèle de la dynamique de la transition,

LES AUTEURS



Arantazu MASCARAQUE est professeur de physique à l'Université Complutense de Madrid, en Espagne. Antonio TEJEDA est physicien à l'Institut Jean Lamour du CNRS, à Nancy.

BIBLIOGRAPHIE

L. Chaput et al., Giant alkali-metal-induced lattice relaxation as the driving force of the insulating phase of alkali-metal/Si(111):B, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 107, 187603, 2011.

R. Cortès et al., Observation of a Mott insulating ground state for Sn/Ge(111) at low temperature, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, 126103, 2006.

G. Profeta et E. Tosatti, Triangular Mott-Hubbard insulator phases of Sn/Si(111) and Sn/Ge(111) surfaces, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, 086401, 2007.

S. Modesti et al., Insulating ground state of Sn/Si(111)-(3x3) R30°, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, 126401, 2007.

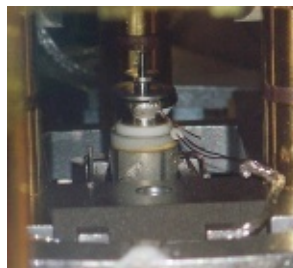
LES RECONSTRUCTIONS VUES AU MICROSCOPE À EFFET TUNNEL

Le microscope à effet tunnel révèle la topographie d'une surface à l'échelle atomique. Sa pointe effilée se déplace très près de la surface sans entrer en contact avec elle. Des actionneurs piézo-électriques rendent ce mouvement précis à l'échelle atomique (l'ångström, soit 10^{-10} mètre). Dans ces conditions, on applique une minuscule différence de potentiel électrique entre la pointe et la surface, ce qui produit un courant par effet tunnel. En d'autres termes, quelques électrons issus de la surface franchissent la barrière d'énergie qui les sépare de la pointe et la rejoignent. Ce courant est utilisé, par l'ordinateur qui contrôle le microscope, comme signal dans

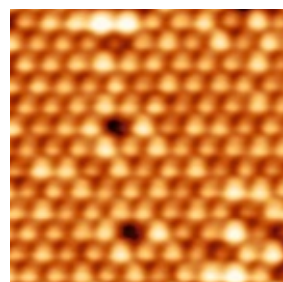
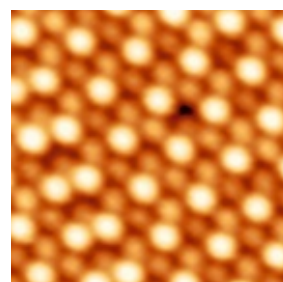
une boucle de rétroaction, qui permet de maintenir constant le courant tunnel, de même que la distance entre la pointe et la surface.

L'enregistrement des mouvements de la pointe au cours du balayage de la surface produit alors des profils de densité électronique, qui permettent de construire une image des orbitales de surface, sorte de photographie des structures électroniques de la surface. Le microscope révèle ainsi la reconstruction notée (3×3) du système étain sur germanium, où les atomes d'étain ont deux altitudes différentes (*en haut à droite*), et la reconstruction $(\sqrt{3} \times \sqrt{3}) R 30^\circ$ où les mêmes atomes se trouvent dans un même plan (*en bas à droite*).

Ainsi, si l'on considère que les positions atomiques et celles des orbitales sont liées, un microscope à effet tunnel permet de « voir » les atomes d'une surface.



Ci-dessus, la tête d'un microscope à effet tunnel au-dessus de la chambre à vide, où l'on place l'échantillon. À droite, les reconstructions du système étain/germanium.



A. MASCARQUE ET A. TENDIN



A. MASCARQUE ET A. TENDIN

4. LE MICROSCOPE À EFFET TUNNEL

de l'Institut Jean Lamour, à l'Université de Nancy. C'est l'un des rares dans le monde à autoriser l'étude de la structure à la fois cristallographique et électronique d'une surface sans qu'il soit besoin d'exposer cette dernière à la pression atmosphérique. Il opère dans une gamme de températures allant de la température ambiante à celle de l'hélium liquide (quatre kelvins) et comprend trois cloches à vide ultrapoussé interconnectées mais indépendantes, entre lesquelles un dispositif permet de déplacer l'échantillon étudié.

capable d'expliquer tous les résultats expérimentaux évoqués. Ce modèle sera un point de départ pour étudier la stabilité en fonction de la température des phases métalliques au voisinage des conditions qui permettent l'apparition d'isolants de Mott. Il permettra ainsi de mieux comprendre les phénomènes physiques complexes qui font que nos matériaux s'éloignent des comportements simples prévus par le modèle des électrons quasi libres.

Nous espérons que nous pourrions alors examiner de près les différences éventuelles entre transitions de Mott en surface et en volume comme dans les isolants de Mott classiques. Cette quête est d'autant plus passionnante que les isolants de Mott ont des caractéristiques proches de celles des supraconducteurs à haute température...

Des transistors à isolants de Mott ?

Plus concret, un autre débouché de tous ces travaux pourrait être d'intéressantes réalisations en nano-ingénierie des surfaces. Si, comme le prédisent certains modèles théoriques, un supraconducteur bidimensionnel pouvait être réalisé par dopage d'étain sur du germanium, il reposerait alors sur le semi-conducteur germanium, c'est-à-dire sur un substrat

compatible avec les dispositifs électroniques actuels. De nombreuses applications deviendraient alors envisageables.

De ce point de vue, les isolants de Mott ont déjà trouvé des applications potentielles là où les semi-conducteurs n'en ont pas. Dans un brevet, Shinichiro Iwai, de l'Université de Tohoku, et ses collègues proposent par exemple d'utiliser des isolants de Mott dans un convertisseur de signaux photoélectriques à cadence très élevée (de l'ordre du térahertz), là où les dispositifs à base de silicium ou de germanium ne sont plus fonctionnels.

De leur côté, Dennis Newns, des Laboratoires IBM, et ses collègues ont réalisé des transistors à effet de champ à l'aide d'isolants de Mott de taille nanométrique, échelle à laquelle les techniques actuelles fondées sur substrat de silicium ne fonctionnent plus bien. On sait que le principe opérationnel d'un transistor consiste à changer un canal conducteur en un canal isolant en fonction d'un certain potentiel électrique. Dans un transistor à transition de Mott, ce potentiel sert à créer des porteurs de charges dans le canal, qui suffisent pour doper l'isolant de Mott et le transformer en conducteur. Puisque les transistors sont à la base de tous nos dispositifs électroniques actuels, aurons-nous un jour des transistors à transition de Mott dans nos radios, nos voitures et nos portables ?

VOS PRIVILÈGES AU SOMMET

1 an • 12 numéros

56 € seulement
au lieu de 74,90 €



Recevez chaque mois votre magazine en version papier et consultez gratuitement sa version numérique en format PDF sur www.pourlascience.fr

POUR LA
SCIENCE



BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner accompagné de votre règlement à :
Service Abonnements • Pour la Science
8, rue Férou • 75278 Paris cedex 06

☐ **Oui, je m'abonne à *Pour la Science* seul** (12 n°s et leur version numérique)

1 an • **56 €** au lieu de ~~74,90 €~~ Tarif valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : Europe 12 € - autres pays 25 €.

☐ **Je préfère m'abonner pour 2 ans en bénéficiant d'une remise exceptionnelle de 29%.**

2 ans • **106 €** au lieu de ~~149,80 €~~ Tarif valable en France métropolitaine et d'outre-mer. Participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : Europe 25 € - autres pays 51 €.

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

_____ @ _____

Mes coordonnées (à remplir) :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. (facultatif) : _____

Je règle par :

☐ Chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ Carte bancaire

Numéro de la carte

Date d'expiration

____/____/____

Signature obligatoire



En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès de Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case ☐.

Les multiples stratégies de *Listeria*

Alice Lebreton, Hélène Bierne et Pascale Cossart

Listeria, la « bactérie des frigos », responsable de la listériose, infecte les cellules en détournant leurs fonctions et en déjouant le système immunitaire.

Fromages au lait cru, saumon fumé, charcuterie sont quelques-uns des produits que la femme enceinte doit éviter de consommer. Et pour cause : s'ils se révèlent contaminés par la bactérie *Listeria monocytogenes*, celle-ci peut déclencher une maladie aux conséquences graves pour le fœtus, la listériose. Après plusieurs épidémies en Amérique du Nord et en Europe, *Listeria* est devenue l'un des contaminants bactériens les plus surveillés des filières agroalimentaires. Cette bactérie se développe dans l'environnement, aussi bien dans le sol et l'eau qu'à la surface des plantes, et contamine facilement les viandes, poissons, charcuteries et produits laitiers non pasteurisés. *Listeria* est souvent dénommée « la bactérie des frigos », car elle est capable de résister et de se développer à basse température, ainsi que dans des milieux salins (saumures) ou acides (aliments fermentés).

Si *Listeria monocytogenes* peut contaminer de nombreux aliments non stérilisés, les infections graves restent rares.

L'ESSENTIEL

✓ Capable de vivre dans le sol, l'eau et à la surface des plantes, la bactérie *Listeria* contamine facilement certains aliments.

✓ Chez les personnes affaiblies et les femmes enceintes, elle peut entraîner des infections graves.

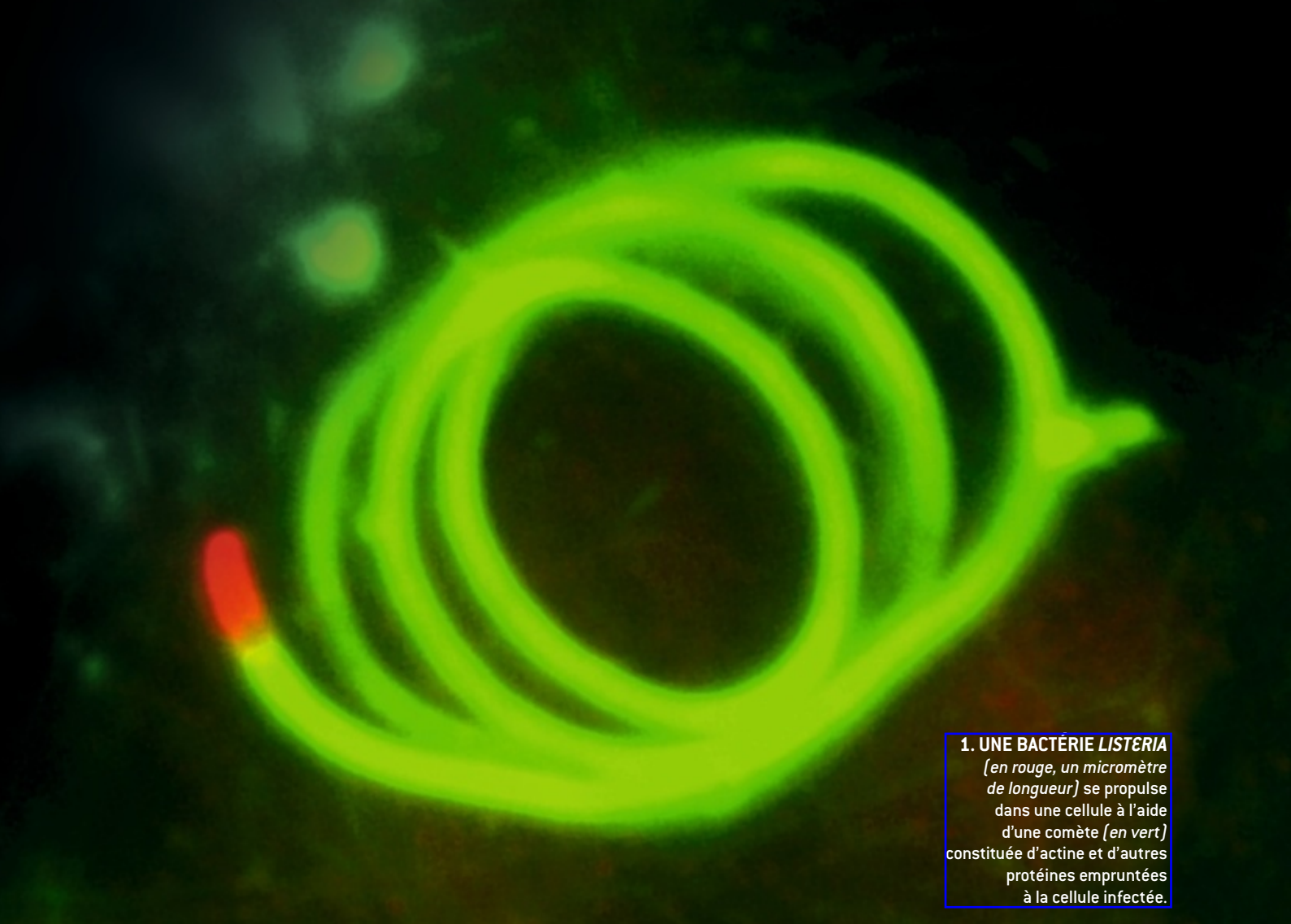
✓ Elle doit sa virulence à une panoplie d'outils qu'elle déploie, tel un « couteau suisse cellulaire », en fonction des situations rencontrées.

✓ Camouflage, piratage, détournement de protéines sont les stratégies que ce microbe met en œuvre.

PH. BOUVER - INSTITUT PASTEUR

L'ingestion en petites quantités de cette bactérie passe le plus souvent inaperçue ; en grandes quantités, elle déclenche parfois des gastro-entérites. Toutefois, *Listeria* est un pathogène opportuniste, capable de traverser la barrière intestinale ; elle est dangereuse pour des personnes dont les défenses immunitaires sont affaiblies par l'âge, la maladie ou certains traitements.

Chez ces patients plus sensibles, la bactérie se propage et prolifère dans l'organisme, causant des septicémies (infections généralisées), des méningites et des encéphalites (infections du cerveau) dont l'issue est fatale dans 30 pour cent des cas, ou laisse des séquelles. Lorsque *Listeria* infecte une femme enceinte, les symptômes sont en général proches de ceux d'une grippe pour la mère ; cependant, la bactérie peut traverser la barrière placentaire et s'attaquer au fœtus, conduisant à la perte de l'enfant, ou à une infection grave chez le nouveau-né. Les recherches ne se concentrent pas sur la mise au point d'un



1. UNE BACTÉRIE *LISTERIA*
(en rouge, un micromètre de longueur) se propulse dans une cellule à l'aide d'une comète (en vert) constituée d'actine et d'autres protéines empruntées à la cellule infectée.

vaccin contre la listériose, car quelques précautions suffisent à protéger les sujets à risques : nettoyer souvent le réfrigérateur, laver les fruits et légumes consommés crus, éviter les fromages au lait cru, salaisons et produits fumés.

La faculté qu'a ce microbe de traverser différentes barrières de l'organisme, comme la paroi du tube digestif, le placenta ou les enveloppes protectrices du cerveau, est liée à son aptitude à pénétrer dans les cellules de l'organisme qu'elle infecte, y survivre et s'y multiplier. Toutes les bactéries pathogènes n'en sont pas capables. Certaines ne traversent même pas les muqueuses. La plupart, enfin, ne pénètrent pas dans les cellules.

Les propriétés de *Listeria* sont dues à une vaste panoplie d'outils moléculaires, acquis au cours de l'évolution, qui lui permettent de détourner à son avantage de nombreuses fonctions cellulaires. Nos recherches s'attachent à élucider les stratégies déployées par *Listeria* pour prendre d'assaut la cellule. Nous espérons ainsi

non seulement comprendre les bases de la pathologie et les contrer, mais aussi améliorer nos connaissances fondamentales sur le fonctionnement des cellules de mammifère. Nous décrivons ici l'étonnant arsenal mis en œuvre par *Listeria monocytogenes* de son entrée dans la cellule à son passage dans une cellule voisine.

Deux clefs pour entrer dans la cellule

L'entrée de la bactérie dans les cellules met en jeu des interactions spécifiques de deux protéines de la surface bactérienne, les internalines InlA et InlB, et leurs récepteurs respectifs à la surface des cellules hôtes : la E-cadhérine et c-Met (voir l'encadré page 44). En l'absence d'infection, ces deux protéines humaines ont des fonctions bien précises. La E-cadhérine crée des jonctions entre cellules recouvrant les muqueuses. La protéine c-Met est le récepteur naturel d'un facteur de croissance, HGF, qui stimule la multiplication des cellules et leur mobilité.

Lorsqu'elles entrent en contact avec la E-cadhérine et c-Met, les internalines InlA et InlB activent et détournent les fonctions cellulaires normales de ces protéines. Leur liaison déclenche dans la cellule des voies de signalisation en cascade qui aboutissent au recrutement, à proximité de la zone de contact entre la bactérie et la cellule, de protéines du cytosquelette – un réseau de filaments qui participent au maintien de l'architecture des cellules (voir l'encadré page 46). L'agencement de ces protéines crée des forces qui déforment la membrane cellulaire à proximité de la bactérie : des forces de propulsion projettent des extensions de membrane autour de la bactérie, tandis que des forces de traction entraînent la bactérie vers l'intérieur de la cellule.

Parmi les différentes protéines du cytosquelette impliquées dans l'entrée, l'actine s'organise en polymères qui s'allongent à une extrémité ou se raccourcissent à l'autre. Des moteurs moléculaires, les myosines, font glisser les câbles, ce qui

LES AUTEURS



Alice LEBRETON est chargée de recherche de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA).
Hélène BIERNE est directrice de recherche du même Institut. Elles travaillent au sein de l'Unité des interactions bactéries-cellules, à l'Institut Pasteur (Paris), dirigée par Pascale COSSART.

engendre des forces de traction ou de propulsion entre deux points d'ancrage du réseau. Le cytosquelette étant relié à la membrane, celle-ci s'invagine peu à peu sous l'effet de ces forces, entraînant avec elle la bactérie vers l'intérieur de la cellule. *Listeria* se retrouve englobée dans des extensions membranaires qui se referment, donnant naissance à une vacuole au cœur de la cellule.

Des pores pour déstabiliser la cellule

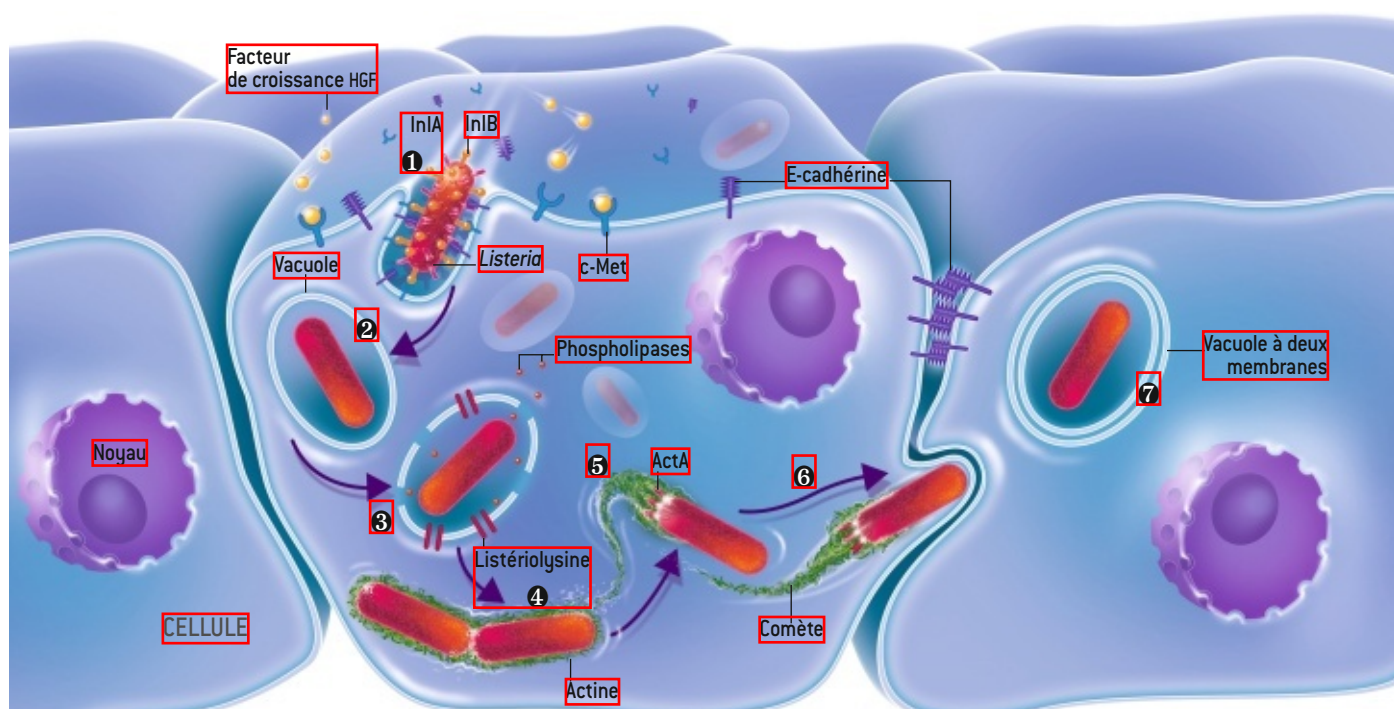
Contrairement à la plupart des autres bactéries pénétrant dans les cellules, *Listeria monocytogenes* ne reste pas dans cette vacuole. Elle sécrète plusieurs protéines qui déstabilisent la structure des membranes : la listériolysine et les phospholipases. La listériolysine perce la membrane de la vacuole : plusieurs molécules s'insèrent dans la membrane et s'associent en anneaux, formant des pores par lesquels circulent de nombreux constituants cellu-

lares, ce qui modifie localement l'acidité et la salinité. Quant aux phospholipases, ce sont des enzymes qui dégradent les constituants de la membrane. Sous l'action conjointe de ces protéines, la vacuole est dégradée et la bactérie s'échappe vers le cytoplasme – l'intérieur de la cellule.

La capacité de *Listeria* à sortir de la vacuole est un atout crucial qui lui évite d'être éliminée par les défenses de l'hôte. Cela est particulièrement critique dans les macrophages, des cellules immunitaires qui reconnaissent les agents étrangers, les capturent et les ingèrent au sein d'une vacuole nommée phagosome : c'est la phagocytose. Le phagosome formé fusionne avec des compartiments cellulaires acides – les lysosomes –, lesquels contiennent des enzymes qui dégradent le contenu vacuolaire. *Listeria* échappe à cette dégradation en bloquant la fusion entre phagosome et lysosome et en rompant la membrane de la vacuole.

La listériolysine, considérée comme le facteur de virulence majeur de *Listeria*,

LE CYCLE CELLULAIRE DE *LISTERIA*



Listeria pénètre dans la cellule grâce à l'interaction des internalines InlA et InlB, à sa surface, et de leurs récepteurs respectifs sur la membrane cellulaire, E-cadhérine et c-Met (1). La bactérie est ensuite ingérée par invagination de la membrane, qui se referme et forme une vacuole (2). *Listeria* dégrade

la membrane de la vacuole grâce aux enzymes phospholipases et aux pores membranaires créés par la listériolysine (3). Dans le cytoplasme, *Listeria* se multiplie en utilisant les ressources énergétiques de la cellule (4). La protéine ActA permet à la bactérie de se déplacer, car elle stimule la polymérisation

de l'actine à une extrémité (5). Les filaments d'actine forment une comète qui propulse la bactérie vers les cellules voisines, où un nouveau cycle commence (6) dans des vacuoles à deux membranes (7). Les clichés de microscopie électronique ci-contre illustrent ces différentes étapes.

joue un rôle clef dans ce processus. En formant des pores dans les membranes, elle permet l'entrée d'ions calcium, lesquels inhibent une protéine de la membrane des lysosomes (LAMP1), retardant ainsi la fusion avec le phagosome. Dans l'intervalle, la bactérie s'échappe vers le cytoplasme.

Ce ne sont pas les seuls rôles de la listériolysine. Synthétisée par *Listeria* avant même son entrée dans la cellule, cette toxine plurifonctionnelle a de nombreux autres effets sur la physiologie cellulaire. Par exemple, les pores qu'elle ouvre dans la membrane de la cellule permettent l'entrée d'ions calcium vers le cytoplasme, et la sortie d'ions potassium. L'augmentation de la concentration de calcium dans la cellule a des conséquences diverses. Par exemple, elle facilite l'entrée des bactéries dans la cellule. En perturbant la forme et la fonction des mitochondries, elle conduit aussi à une interruption, brutale mais transitoire, de la production d'énergie cellulaire. Simultanément, la diminution de la concentration en potassium modifie les

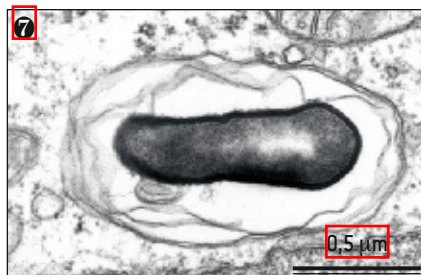
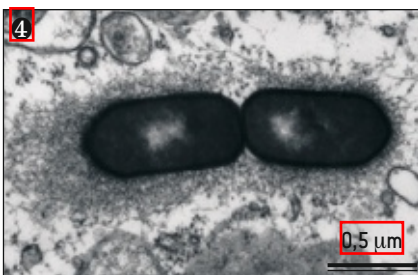
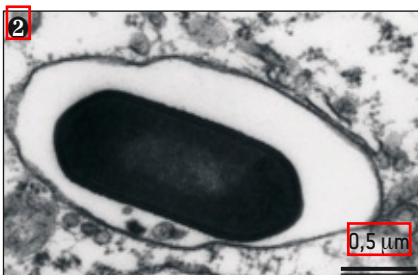
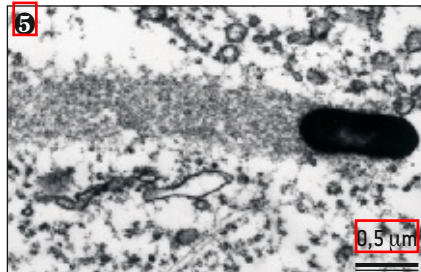
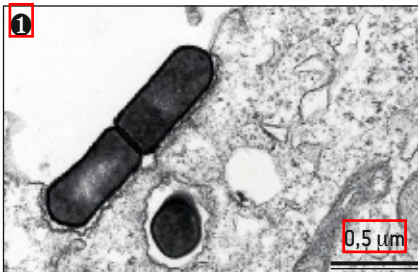
programmes d'expression des gènes de la cellule hôte (nous y reviendrons).

Enfin, certains effets de la listériolysine sont indépendants des flux d'ions. Dans des cellules non infectées, une petite protéine, nommée SUMO, est greffée sur de nombreuses protéines de la cellule ; cette modification – ou sumoylation – perturbe la localisation de certaines protéines, leur capacité à interagir avec leurs partenaires, ou leur stabilité. Lors de l'infection, la listériolysine déclenche la dégradation de l'enzyme responsable de la sumoylation des protéines cellulaires, entraînant une « désomoylation » générale des protéines de l'hôte, susceptible d'altérer leur fonction.

Revenons au cycle de *Listeria* dans la cellule. Une fois dans le cytoplasme, libérée de la vacuole membranaire, la bactérie est exposée à des conditions environnementales très différentes de celles rencontrées à l'extérieur. Elle s'y adapte en changeant le programme d'expression de ses gènes. Elle se met à produire (ou surproduire) la

Glossaire

- ✓ **CYTOPLASME** : ensemble du contenu d'une cellule, à l'exception du noyau.
- ✓ **NOYAU** : organe central de la cellule, contenant les chromosomes porteurs de l'information génétique sous forme d'ADN.
- ✓ **TOXINE** : substance biologique dotée d'un pouvoir pathogène.
- ✓ **FACTEURS DE VIRULENCE** : molécules produites par un pathogène, qui lui donnent un avantage à l'une des étapes du cycle infectieux. La production de ces facteurs est régulée en fonction des conditions environnementales, et s'ajuste ainsi aux besoins de la bactérie.
- ✓ **LYMPHOCYTES T CYTOTOXIQUES** : cellules immunitaires qui reconnaissent et détruisent spécifiquement les cellules infectées par un pathogène. Ils gardent en mémoire les caractéristiques du pathogène rencontré, permettant une réponse plus rapide et efficace en cas de nouvelle infection.



La bactérie *Listeria* détourne des éléments du squelette interne de la cellule, nommé cytosquelette, à deux étapes de son cycle intracellulaire : pour entrer dans la cellule et pour s'y déplacer. Le cytosquelette est un réseau de filaments protéiques qui confèrent à la cellule sa forme et sa capacité à se mouvoir et à se diviser. Ces filaments s'assemblent et se séparent de façon dynamique, gouvernant les déformations de la membrane de la cellule et les mouvements intracellulaires. Le cytosquelette est ainsi une sorte d'échafaudage, qui crée une rigidité tout en participant au transport de divers constituants, tels des enzymes, des vésicules ou des chromosomes, et à leur positionnement dans le cytoplasme. Voici le rôle de quelques composants du cytosquelette – l'actine, la myosine, les septines et la clathrine –, et la façon dont *Listeria* les utilise.

L'actine est une petite protéine globulaire qui forme des filaments par polymérisation. L'élongation, la

stabilité et l'organisation spatiale des filaments sont régularisées par un ensemble de protéines associées à l'actine. Par exemple, le complexe protéique Arp2/3 déclenche la polymérisation de l'actine et permet l'assemblage des filaments en réseau. À l'inverse, la cofiline stimule la dépolymérisation de ces filaments.

Listeria utilise la force de propulsion produite par la polymérisation/dépolymérisation de l'actine aussi bien pour entrer dans une cellule que pour s'y déplacer. En activant les récepteurs E-cadhérine et c-Met à la surface des cellules, elle déclenche le recrutement séquentiel du complexe Arp2/3 et de la cofiline, ainsi que d'autres régulateurs de l'actine, ce qui pousse la membrane cellulaire au site d'entrée de la bactérie.

Une fois libérée dans le cytoplasme, *Listeria* utilise la protéine ActA pour recruter le complexe Arp2/3 et déclencher la polymérisation de l'actine à l'une de ses extrémités. Ce faisceau de filaments

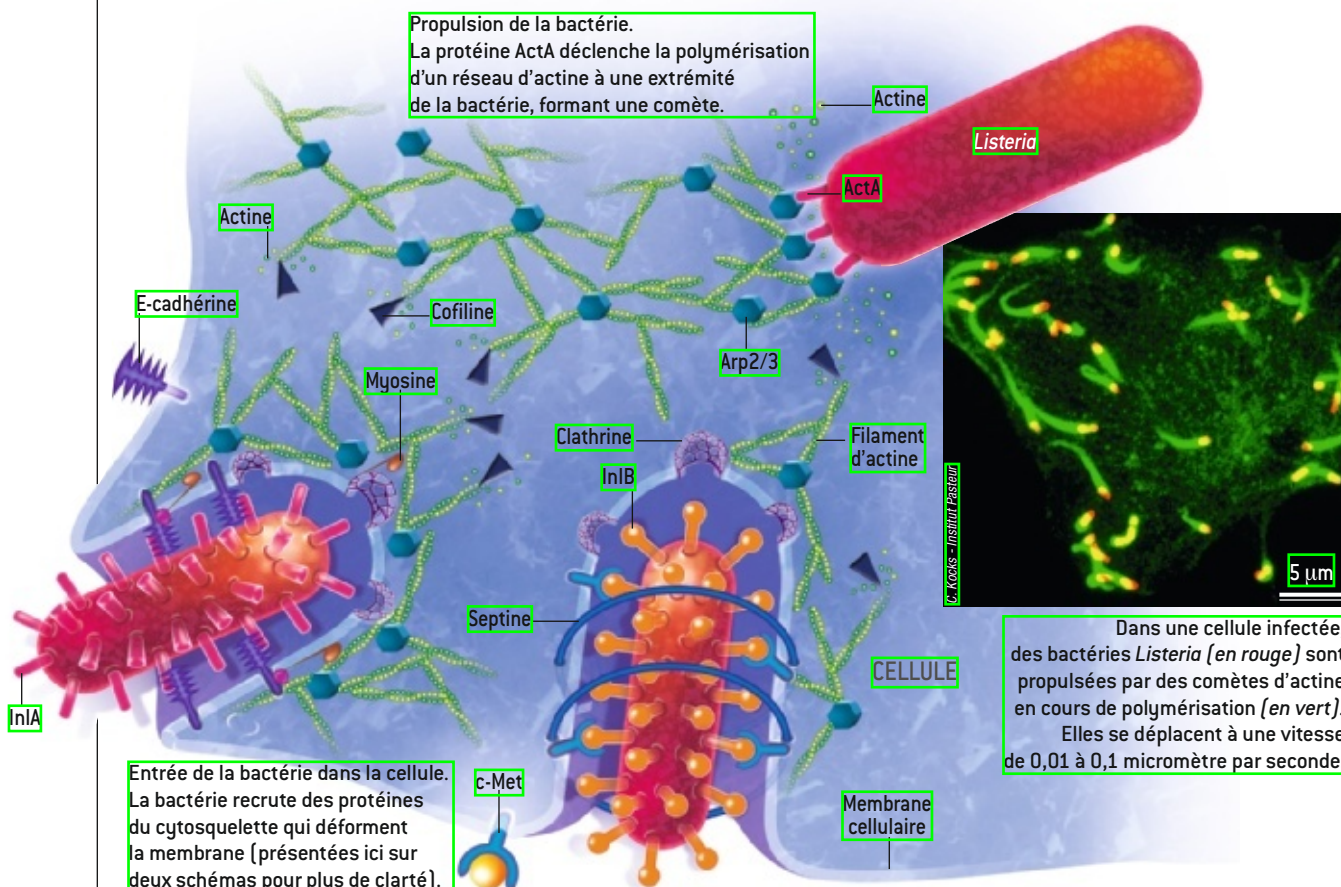
d'actine constitue une comète, qui propulse la bactérie en s'allongeant d'un côté et en se désorganisant de l'autre, sous l'action de la cofiline.

La force de propulsion créée par la polymérisation de l'actine est souvent couplée à une force de traction engendrée par des protéines motrices, les myosines. Ces protéines convertissent l'énergie chimique produite par la cellule en force mécanique grâce à des changements de conformation. *Listeria* utilise cette force pour entrer dans une cellule : lors de l'activation des récepteurs E-cadhérine et c-Met, des myosines sont recrutées au site d'entrée de la bactérie et contribuent à la déformation de la membrane cellulaire, la tirant le long de la bactérie comme une couverture en prenant appui sur les filaments d'actine.

D'autres protéines, les septines, s'organisent également en filaments entourant la bactérie lors de son entrée dans la cellule. Ces filaments forment des anneaux, dont le rôle reste incompris.

Enfin, la clathrine favorise l'entrée de la bactérie dans la cellule. Cette protéine, qui s'assemble en une structure grillagée formant une cage sphérique, tapisse les vésicules produites par endocytose. Ce processus permet à la cellule d'ingérer des molécules extracellulaires ou de recycler ses constituants membranaires : la membrane cellulaire s'incurve en formant de petites vésicules dans le cytoplasme.

En raison du diamètre réduit des cages de clathrine, on a longtemps pensé que la protéine n'était impliquée que dans l'endocytose de vésicules de petite taille ; cependant, l'étude du mécanisme d'entrée de *Listeria* et de certains virus dans les cellules a montré que la clathrine participe aussi à l'ingestion d'objets de dimensions plus importantes, telles les bactéries. Sous la membrane de la vacuole se formant autour de *Listeria*, la clathrine semble s'agencer en plusieurs cages connectées au cytosquelette.



plupart de ses facteurs de virulence (la listériolysine, les phospholipases, mais aussi d'autres protéines telles ActA et InlC, nous y reviendrons) ainsi que des molécules renforçant sa paroi, et modifie ses mécanismes d'import de nutriments. Ces changements lui permettent de modifier son métabolisme en fonction des nouvelles sources d'énergie à sa disposition dans le cytoplasme. En outre, avec ce nouvel arsenal, elle détourne des protéines du cytoplasme à son avantage, tout en luttant contre les mécanismes de défense de son hôte. Voyons comment.

Une comète d'actine pour avancer

Le premier obstacle qu'elle contourne est la reconnaissance par les anticorps qui circulent dans le milieu extracellulaire : ces anticorps déclenchent une réaction immunitaire qui neutralise l'agent pathogène détecté. *Listeria* les évite en entrant dans les cellules et en colonisant les tissus.

Pour se déplacer à l'intérieur des cellules, *Listeria* utilise une nouvelle fois les constituants du cytosquelette, grâce à une protéine de sa surface : ActA. En imitant des protéines de la cellule, ActA recrute à une extrémité de la bactérie l'équipement moléculaire nécessaire à la polymérisation de l'actine (voir l'encadré page ci-contre). En particulier, ActA stimule la fonction d'Arp2/3, un complexe cellulaire capable de démarrer la genèse de nouveaux filaments en constituant une extrémité à partir de laquelle ils s'allongent et en créant des fourches dans les filaments en croissance. En s'allongeant, les filaments d'actine forment une sorte de comète qui propulse la bactérie à travers le cytoplasme : les filaments créent une pression sur toute la paroi recouverte, qui propulse la bactérie. Comme la comète d'actine prend appui sur les éléments cellulaires qu'elle rencontre, la bactérie avance.

Lorsque la bactérie rencontre la membrane de la cellule, la poussée exercée par la comète d'actine est suffisante pour que la membrane se déforme vers l'extérieur, ou vers la cellule voisine. Entourée alors de deux membranes, la bactérie pénètre dans une nouvelle cellule et le cycle recommence. En passant ainsi de cellule en cellule, sans rupture de la cellule infectée, *Listeria* reste à l'abri des défenses immunitaires de l'hôte qui circulent dans le milieu extracellulaire.

Les autres obstacles rencontrés par la bactérie sont intracellulaires. L'organisme a développé divers moyens pour reconnaître et lutter contre les pathogènes – tant bactériens que viraux ou protozoaires – qui infectent les cellules. *Listeria* utilise plusieurs stratégies pour limiter la mise en place de ces défenses. En premier lieu, elle se protège des systèmes de surveillance de l'hôte (voir les figures 2 et 3).

Certains constituants bactériens sont perçus comme des signaux de danger par des récepteurs de l'hôte, et déclenchent une réponse immunitaire non spécifique. Par exemple, les bactéries sont entourées d'une paroi rigide composée d'un polymère, le peptidoglycane ; une enzyme de la vacuole, le lysozyme, attaque cette paroi, libérant des fragments qui sont reconnus par les molécules sentinelles de l'immunité innée (non spécifique). Cependant, deux enzymes de *Listeria*, PgdA et OatA, modifient la composition chimique du peptidoglycane ; ces modifications empêchent la reconnaissance de la paroi par le lysozyme, et donc sa dégradation, ce qui augmente la résistance de la bactérie et lui évite d'être reconnue par le système immunitaire.

Dans le cytoplasme des cellules infectées, *Listeria* est confrontée à une deuxième barrière de surveillance : l'autophagie. Quand la cellule détecte un corps étranger dans son cytoplasme, elle l'entoure d'une vacuole – un autophagosome. Tout comme celui des phagosomes des macrophages, le contenu de cet autophagosome est dégradé par fusion avec des lysosomes. *Listeria*, cependant, échappe souvent à l'autophagie. ActA et une autre protéine, InlK, la camouflent en recrutant, l'une la machinerie de polymérisation de l'actine, l'autre de grosses particules nommées Vault (dont on ne connaît pas le rôle dans la cellule). Ainsi dissimulée sous un manteau de constituants cellulaires, la bactérie devient inaccessible aux acteurs de l'autophagie.

Ces différents mécanismes de dissimulation de la bactérie étant imparfaits, les réponses immunitaires de l'organisme se mettent quand même en place. La détection d'un pathogène par les cellules infectées déclenche, entre autres, la production et la libération de molécules, les cytokines, qui agissent comme des signaux d'alarme. Ces cytokines renforcent les défenses des cellules avoisinantes et attirent des cellules immunitaires non spécifiques jouant diverses fonctions : détruire les cellules

✓ BIBLIOGRAPHIE

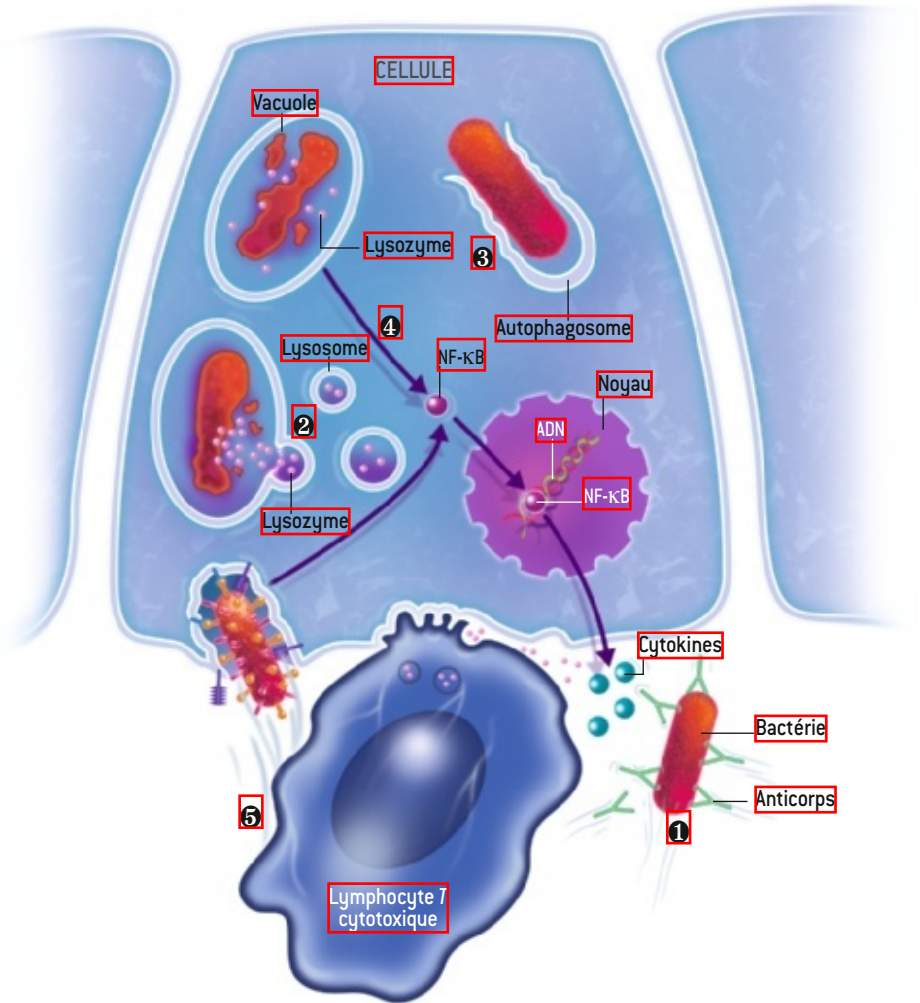
P. Cossart, Illuminating the landscape of host-pathogen interactions with the bacterium *Listeria monocytogenes*, PNAS, vol. 108, n° 49, pp. 19484-19491, 2011.

F. Stavru et al., Cell biology and immunology of *Listeria monocytogenes* infections : novel insights, Immunol. Rev., vol. 240, pp. 160-184, 2011.

R. Singh et A. Wallecha, Cancer immunotherapy using recombinant *Listeria monocytogenes* : transition from bench to clinic, Hum. Vaccin., vol. 7, n° 5, pp. 497-505, 2011.

2. LES DÉFENSES mises en œuvre

par l'organisme contre les bactéries invasives sont de plusieurs types. Hors des cellules, des anticorps détectent la bactérie et entraînent sa destruction par le système immunitaire (1). Dans les cellules, les lysosomes fusionnent avec les vacuoles contenant la bactérie et libèrent des enzymes qui la dégradent, dont le lysozyme (2). L'autophagosome détruit les bactéries qui se sont échappées de la vacuole (3). Les fragments de bactérie sont reconnus par des molécules sentinelles, qui envoient la protéine NF- κ B dans le noyau, où elle déclenche diverses réponses immunitaires, dont la synthèse de cytokines (4). Entre autres effets, ces molécules alertent des lymphocytes T cytotoxiques qui dégradent la cellule infectée (5) (les échelles n'ont pas été respectées).



infectées, éliminer les débris cellulaires et bactériens, et stimuler la réponse immunitaire acquise (spécifique, par opposition à la réponse immunitaire innée). Cette dernière, principalement représentée par les lymphocytes T cytotoxiques, détruit spécifiquement les cellules infectées par *Listeria*. La bactérie s'en protège néanmoins grâce à la listériolysine, qui déclenche l'apoptose, c'est-à-dire le programme d'autodestruction, de ces lymphocytes.

Détourner l'expression des gènes

Dans sa lutte contre les réponses immunitaires de l'hôte, *Listeria* bénéficie d'un troisième niveau d'action : elle sécrète dans la cellule plusieurs molécules qui « piratent » le programme génétique de la cellule, contrôlant ainsi la production de cytokines ou d'autres molécules de défense.

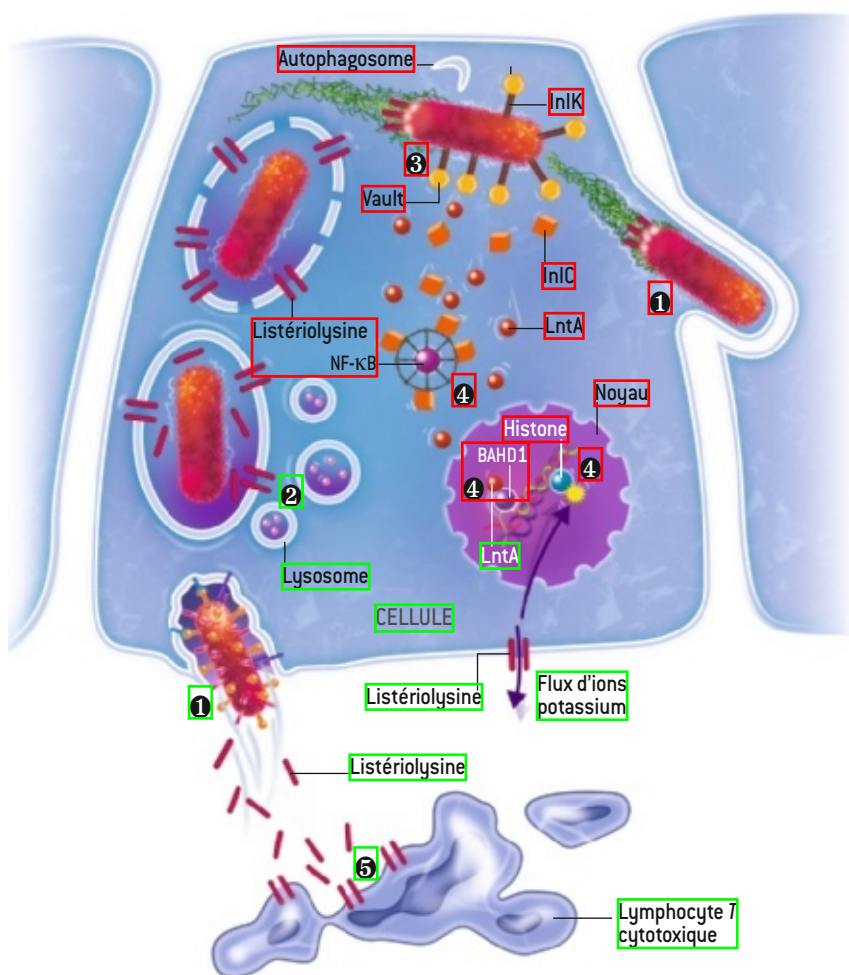
La principale voie d'activation des réponses immunitaires innées (non spécifiques du pathogène rencontré) dépend du facteur NF- κ B. En l'absence d'infection, cette protéine est retenue dans le cytoplasme. Lors de l'infection par *Listeria*, des composés bactériens sont reconnus par les molécules sentinelles de la cellule hôte. Plusieurs cascades de réactions moléculaires conduisent alors au transfert de NF- κ B dans le noyau, où il déclenche l'expression de nombreux gènes de l'hôte, et en particulier de ceux codant des cytokines, qui stimulent les défenses immunitaires.

Deux facteurs de virulence de *Listeria* renforcent cette voie : InlB, en se liant au récepteur c-Met, déclenche de nombreuses reprogrammations en cascade, notamment l'activation de NF- κ B ; la listériolysine active aussi NF- κ B (voir la figure 3).

Cependant, *Listeria* met en œuvre d'autres mécanismes qui contrebalancent l'activation des défenses immunitaires. Une internaline qu'elle sécrète, InlC, renforce la séquestration de NF- κ B dans le cytoplasme, limitant la production de cytokines. En outre, la listériolysine module l'expression de certains gènes de l'hôte. Nous avons vu que les pores membranaires qu'elle forme entraînent une diminution de la concentration intracellulaire en potassium. Par un mécanisme qui reste à élucider, cette diminution modifie des protéines du noyau nommées histones, étroitement associées aux brins d'ADN pour former une structure plus compacte : la chromatine. Sous l'effet de ces modifications chimiques des histones (phosphorylations, acétylations, méthylations...), la structure de la chroma-

tine s'ouvre ou se ferme localement, ce qui affecte la quantité d'ARN messager produite par certains gènes, et change le programme de fonctionnement de la cellule. La listériolysine diminue ainsi l'expression de plusieurs gènes impliqués dans la réponse immunitaire de la cellule à l'infection.

Une autre stratégie de détournement de l'expression des gènes de l'hôte a été récemment mise au jour. Celle-ci fait intervenir un facteur de virulence de *Listeria*, LntA, et une protéine de la cellule, BAH1D1. Localisée dans le noyau, BAH1D1 verrouille la chromatine dans les régions régulatrices de certains gènes, réprimant ainsi leur expression. Lorsque la bactérie sécrète LntA dans la cellule hôte, cette petite protéine pénètre dans le noyau, interagit avec BAH1D1 et empêche la répression d'une classe particulière de gènes de l'immunité. Pour des raisons encore mal comprises, l'augmentation ponctuelle de cette réponse immunitaire semble favorable à la bactérie. *Listeria* est donc capable de moduler à son avantage les programmes de défense de son



3. *LISTERIA* dispose d'un arsenal de ripostes pour déjouer les défenses de l'hôte. La bactérie passe inaperçue des anticorps circulant hors des cellules en entrant dans les cellules et en s'y déplaçant (1). Elle évite d'être dégradée en bloquant la fusion des lysosomes avec le phagosome et en modifiant sa surface (2). Elle se dissimule des molécules sentinelles de la cellule hôte qui conduisent à l'autophagie ou à la stimulation de l'inflammation en recrutant des protéines de la cellule (par exemple Vault, 3). Elle module l'expression des gènes de l'hôte impliqués dans la réponse immunitaire en perturbant l'activité de protéines (4) : NF-κB est séquestrée dans le cytoplasme par InlC, BAHD1 ne régule plus l'activité de certains gènes sous l'effet de LntA, et le flux d'ions potassium causé par la listériolysine perturbe une protéine impliquée dans la régulation des gènes, l'histone. La listériolysine détruit aussi les lymphocytes T cytotoxiques (5).

Peut-être parviendrons-nous même un jour à détourner *Listeria monocytogenes* à notre avantage. Une particularité de la réponse immunitaire contre *Listeria* est de reposer principalement sur les lymphocytes T cytotoxiques. Or l'organisme ne produit en général pas de lymphocytes T cytotoxiques contre ses propres cellules, même malignes, car elles ne sont pas reconnues comme des corps étrangers. Aussi plusieurs équipes développent-elles actuellement des souches de *Listeria* génétiquement modifiées, sécrétant des molécules spécifiques de cellules cancéreuses, afin de concevoir des vaccins contre certains cancers.

Ces bactéries dépourvues de pouvoir pathogène infecteraient l'organisme pendant de courtes périodes, puis seraient éliminées. Entre-temps, elles stimuleraient la production de lymphocytes T cytotoxiques qui reconnaîtraient et détruiraient aussi bien les cellules infectées par les bactéries *Listeria* modifiées que les cellules cancéreuses. Par exemple, une souche de *Listeria* atténuée exprimant la mésothéline est en cours de développement, afin de produire un vaccin contre les métastases dans les cancers avancés du foie. Fortement exprimée à la surface des cellules tumorales à ce stade, et peu à la surface des cellules saines, la mésothéline aiderait les lymphocytes T cytotoxiques activés par la *Listeria* modifiée à détruire spécifiquement les cellules tumorales. ■

hôte, dans un sens ou un autre lors des différentes phases de l'infection.

Grâce aux multiples stratégies de colonisation et de dissimulation qu'elle met en place lors de l'infection, *Listeria monocytogenes* persiste dans l'organisme, passant inaperçue des mécanismes de reconnaissance immunitaire. Elle peut infecter de très nombreux types cellulaires, y compris des cellules mobiles (des cellules de l'immunité telles que les macrophages et les cellules dendritiques), et ainsi se propager dans tout l'organisme. Souvent, le patient ne montre aucun symptôme pendant plusieurs jours, voire plusieurs semaines, durant lesquels s'instaure sans doute un équilibre entre croissance et élimination des bactéries. Cependant, l'équilibre entre la bactérie pathogène et son hôte bascule parfois vers une forme aiguë, le plus souvent chez des sujets âgés ou immunodéprimés. Dans certains cas, cette rupture d'équilibre conduit à une septicémie : une infection générale de l'organisme accompagnée d'un emballement de la réponse inflammatoire. Dans d'autres cas,

la bactérie parvient à franchir les barrières protégeant le cerveau, déclenchant une méningite ou une encéphalite, ou celles protégeant le fœtus chez la femme enceinte.

Utiliser *Listeria* en thérapie ?

L'aptitude remarquable de *Listeria* à détourner les fonctions de la cellule qu'elle infecte conduit les chercheurs à explorer de nombreux processus cellulaires fondamentaux, bien au-delà des mécanismes infectieux et des moyens de protection. Ainsi, l'étude d'ActA a permis de découvrir le complexe Arp2/3 et son rôle crucial dans le mouvement des cellules. L'étude de LntA a aussi conduit à la découverte et à la caractérisation approfondie du facteur chromatinien BAHD1. Enfin, l'étude des mécanismes d'entrée de *Listeria* dans la cellule a contribué à comprendre le rôle de différents acteurs de l'endocytose permettant aux cellules de capter et transporter des particules extracellulaires vers le cytoplasme.

Le multivers existe-t-il

George Ellis

L'idée d'univers parallèles radicalement différents du nôtre est séduisante, mais excessivement spéculative.

Depuis une dizaine d'années, une hypothèse extraordinaire passionne les cosmologistes : l'Univers que nous sommes en mesure d'observer ne serait pas unique, il en existerait des milliards d'autres. En d'autres termes, l'Univers ferait partie d'un « multivers » plus vaste. Certains scientifiques de renom ont parlé de révolution super-copernicienne. Selon cette idée, non seulement la Terre n'est qu'une planète parmi tant d'autres, mais l'Univers est lui-même insignifiant à l'échelle cosmique, un parmi un nombre incalculable d'autres univers régis par leurs propres lois.

Le terme multivers a plusieurs significations. Nous pouvons sonder l'espace qui nous entoure jusqu'à environ 42 milliards d'années-lumière, distance qui correspond à celle parcourue par la lumière depuis le Big Bang en tenant compte de l'expansion cosmique. Mais il n'y a aucune raison de penser que l'Univers s'arrête à cet

horizon cosmologique. Il pourrait se prolonger indéfiniment au-delà, semblable à notre région observable. Seule la distribution de matière différerait d'une région à l'autre, mais les lois physiques seraient identiques. Presque tous les cosmologistes, et j'en fais partie, acceptent cette vision du multivers comme une collection de régions similaires. Le cosmologiste d'origine suédoise Max Tegmark l'a qualifié de « multivers de niveau 1 ».

Mais certains vont plus loin. Ils imaginent une infinité d'univers différents, régis par des lois physiques différentes, ayant des histoires différentes, voire des espaces n'ayant pas le même nombre de dimensions. La plupart seraient stériles, mais certains grouilleraient de vie. L'un des principaux partisans de ce multivers de « niveau 2 » est le cosmologiste d'origine russe Alexander Vilenkin, qui dresse le tableau spectaculaire d'un ensemble infini d'univers renfermant une infinité de galaxies, une infinité de planètes et une infinité de personnes qui sont votre sosie et qui sont en train de lire cet article.

De telles représentations ne datent pas d'hier et se retrouvent dans de nombreuses cultures à travers l'histoire. Ce qui est nouveau, c'est l'idée que le multivers soit une théorie scientifique, avec tout ce que cela implique de rigueur logique et de confrontation à l'expérience. Cette idée me laisse sceptique. Je ne pense pas que l'existence de ces autres univers ait été prouvée, ou même qu'elle puisse jamais l'être. Selon moi, les partisans du multivers ne se contentent pas d'élargir notre conception de la réalité physique, ils redéfinissent implicitement ce qu'on entend par « science ».

Ceux qui souscrivent à l'hypothèse du multivers de niveau 2 ne manquent pas d'idées pour expliquer cette prolifération d'univers ou pour les mettre en évidence. Ces univers pourraient par exemple se situer dans des régions très éloignées de l'espace, qui ne se sont pas dilatées au même rythme que la nôtre, comme l'envisage le modèle d'inflation éternelle d'Alan Guth, Andrei Linde et d'autres. Ces univers pourraient avoir existé avant le nôtre, comme le propose le modèle cyclique de Paul Steinhardt

L'ESSENTIEL

✓ D'après de nombreux cosmologistes, il existerait, au-delà de l'horizon de notre univers observable, un nombre immense d'autres Univers, chacun doté de ses propres lois physiques. L'ensemble de ces univers constitue le « multivers ».

✓ Cependant, selon George Ellis, aucune observation astronomique ne pourra jamais mettre en évidence ces autres univers.

✓ Les arguments en faveur du multivers sont au mieux indirects. Et même s'il existe, des questions profondes restent sans réponse.

LEVI BROWN

et Neil Turok. Ou encore exister en parallèle, en tant que d'autres réalisations des états quantiques de l'Univers, comme le soutiennent David Deutsch et Michael Lockwood. Ces univers pourraient aussi être complètement déconnectés de notre espace-temps, comme l'ont suggéré M. Tegmark et Dennis Sciama.

Parmi tous ces scénarios, celui qui est le plus largement accepté est l'inflation éternelle. C'est donc sur ce dernier que je vais me focaliser. Cependant, la plupart de mes remarques s'appliquent aussi aux autres propositions. L'idée du scénario inflationnaire est que l'espace est un vide en perpétuelle expansion, au sein duquel les fluctuations quantiques font en permanence se dilater en accéléré de nouvelles régions, donnant ainsi naissance à des chapelets d'univers, comme des bulles dans un bain moussant.

Le concept d'inflation remonte aux années 1980 et a été revisité depuis dans le cadre de la théorie des cordes, la théorie des interactions fondamentales la plus prometteuse à ce jour. Ce cadre autorise des univers-bulles très différents les uns des autres. En effet, chacun commence son existence non seulement avec une distribution aléatoire de matière, mais aussi avec un jeu aléatoire de particules et de lois physiques. Notre Univers contient par exemple des électrons et des photons interagissant par le biais de la force électromagnétique; d'autres univers pourraient avoir d'autres types de particules et de forces, ce qui signifie différentes lois physiques. L'ensemble complet de lois locales autorisées est ce qu'on appelle le paysage. Dans certaines interprétations de la théorie des cordes, le paysage est immense, ce qui autorise une prodigieuse variété d'univers.

De nombreux physiciens qui s'intéressent au multivers, en particulier les partisans du paysage de la théorie des cordes, ne prêtent pas vraiment d'attention aux univers parallèles en eux-mêmes. Pour eux, les objections au concept de multivers n'ont pas d'importance. Leurs théories survivent ou meurent sur la base de leur cohérence interne et, *in fine*, il faut l'espérer, de leur vérification expérimentale. Le multivers est un cadre donné pour leurs théories, et son origine importe peu : c'est le problème des cosmologistes.

Pour un cosmologiste, le problème de base du concept de multivers est l'existence de l'horizon cosmologique. Par définition, les signaux émis au-delà de l'horizon n'ont pas eu le temps de se pro-

pager jusqu'à nous depuis le début de l'Univers. Tous les univers parallèles sont situés au-delà de l'horizon et y resteront quels que soient les progrès techniques. Ils sont trop éloignés pour avoir eu une quelconque influence sur notre Univers. Ainsi, aucune des affirmations concernant le multivers ne peut être prouvée de façon directe.

Les partisans du multivers prétendent pouvoir dire de façon approximative ce qui se passe au-delà de notre horizon cosmique, ou même à une distance infinie, à partir des seules données que nous observons de notre côté de l'horizon. C'est une extrapolation audacieuse ! Peut-être l'Univers se referme-t-il sur lui-même à très grande échelle, et qu'il n'est pas infini. Peut-être que la matière s'arrête quelque part, et qu'il n'y a plus que de l'espace vide au-delà. Peut-être que l'espace et le temps prennent fin au niveau d'une singularité qui délimite l'Univers. Nous ignorons tout simplement ce qui se passe au-delà de l'horizon, car nous n'avons pas d'information sur ces régions et nous n'en aurons jamais.

Sept arguments discutables

La plupart des partisans du multivers sont conscients du problème, mais pensent que nous pouvons néanmoins émettre des hypothèses sur ce qui se passe au-delà de l'horizon. Leurs arguments se regroupent en sept grandes catégories. Examinons-les une par une.

Premier argument : l'espace n'a pas de fin. Tout le monde ou presque admet que l'espace s'étend au-delà de l'horizon cosmique. Si ce type limité de multivers existe, nous pouvons extrapoler ce que nous voyons aux régions situées au-delà de l'horizon, avec une incertitude d'autant plus grande que la région est éloignée. Il est alors facile d'imaginer des variations plus élaborées, telles des lois physiques alternatives ayant cours là où il ne nous est pas donné d'observer. Le problème avec ce type d'extrapolation est que personne ne peut prouver que l'on a tort. Comment les scientifiques peuvent-ils décider si leur tableau d'une région non observable de l'espace-temps est une extrapolation légitime ou irréaliste de ce que nous voyons ? D'autres univers peuvent-ils avoir une distribution initiale de matière différente, ou bien des valeurs différentes des constantes physiques fondamentales ? On peut

QU'Y A-T-IL AU-DELÀ ?

L'Univers observable est une boule d'environ 42 milliards d'années-lumière de rayon centrée sur la Terre. Sa frontière, notre horizon cosmique, correspond à la distance que la lumière a pu parcourir depuis le Big Bang, il y a 13,7 milliards d'années, distance à laquelle s'ajoute l'expansion du cosmos durant cette période. En supposant que l'espace s'étend au-delà de cet horizon cosmique, à quoi ressemble-t-il alors ?

MULTIVERS DE NIVEAU 1 : PLAUSIBLE

L'hypothèse la plus simple est que notre volume d'espace est un échantillon représentatif du reste. Des observateurs distants voient des volumes centrés sur des points différents, mais équivalents, hormis peut-être en ce qui concerne la distribution de matière. L'ensemble de ces régions forment le multivers basique.

MULTIVERS DE NIVEAU 2 : DISCUTABLE

De nombreux cosmologistes imaginent qu'assez loin, le cosmos est très différent de notre Univers observable. Celui-ci serait une bulle-univers parmi de nombreuses autres, flottant toutes dans un espace vide par ailleurs. Les lois de la physique seraient différentes d'une bulle à l'autre, ce qui donnerait lieu à une variété presque inconcevable d'univers. Ces autres bulles d'univers seraient impossibles à observer, même en principe.



avoir l'un comme l'autre, selon les hypothèses que l'on fait.

Deuxième argument : les théories physiques actuelles prédisent l'existence d'autres univers. Les théories proposées pour unifier les interactions font intervenir des champs scalaires, parents hypothétiques d'autres champs tels que le champ magnétique. Ces champs seraient à l'origine de l'inflation cosmique et créeraient des bulles-univers à l'infini. Ces scénarios sont solides d'un point de vue théorique, mais la nature précise des champs hypothétiques n'est pas connue, et aucune expérience n'a encore démontré leur existence et encore moins permis de mesurer leurs propriétés supposées. Autre point crucial, il n'est pas établi que le comportement de ces champs entraîne des lois physiques différentes dans les univers-bulles distincts.

Troisième argument : la théorie de l'inflation, qui prédit une infinité d'univers, a passé avec succès le test observationnel du rayonnement du fond diffus cosmologique. Celui-ci révèle en effet à quoi ressemblerait notre Univers à la fin de sa phase d'expansion initiale. Les motifs du fond diffus suggèrent que notre Univers a réellement connu une période d'expansion accélérée. Mais tous les types d'inflation ne durent pas éternellement

en créant une infinité d'univers-bulles. Les observations ne permettent pas de distinguer le type d'inflation requis des autres. Certains cosmologistes, comme P. Steinhardt, pensent même que l'inflation éternelle aurait conduit à des motifs de fond diffus différents de ceux observés. A. Linde et d'autres ne sont pas d'accord. Qui a raison ? Tout dépend des hypothèses faites sur la nature du champ responsable de l'inflation.

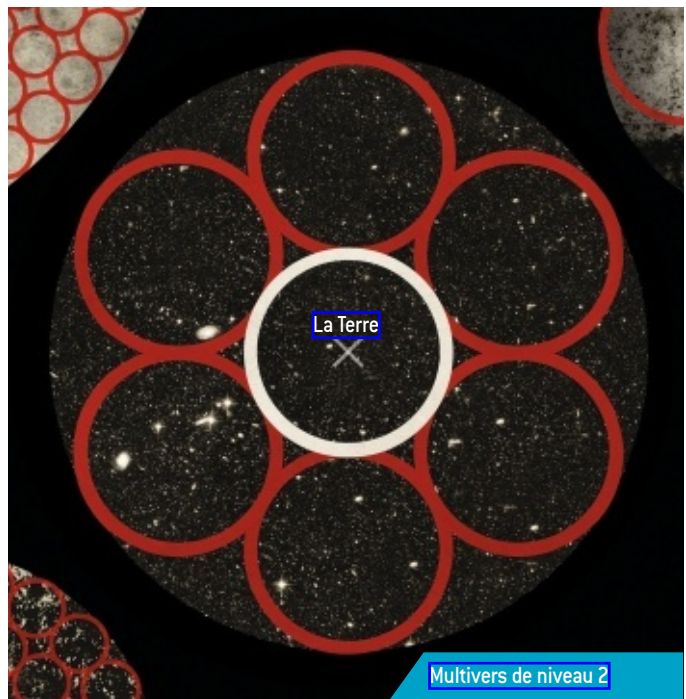
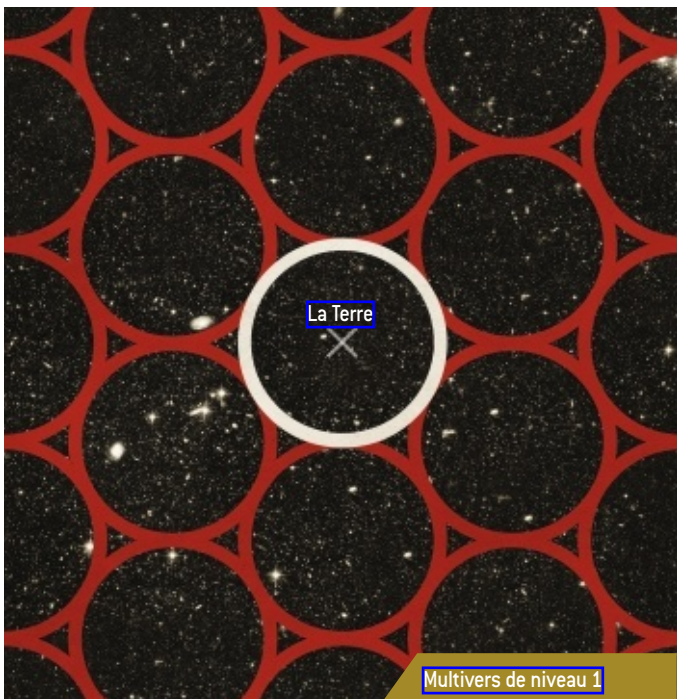
Des hypothèses impossibles à vérifier

Quatrième argument : les constantes fondamentales sont ajustées précisément pour que la vie soit possible. Un des aspects remarquables de notre Univers est que les constantes physiques y ont juste les bonnes valeurs pour permettre l'émergence de structures complexes, et donc de la vie. Steven Weinberg, Martin Rees, Leonard Susskind et d'autres soutiennent que l'existence d'un multivers de niveau 2 apporte une explication élégante à cette coïncidence : si toutes les valeurs possibles des constantes sont réalisées dans un ensemble suffisamment grand d'univers, alors il y en a sûrement quelques-uns qui peuvent héberger la vie. Ce raisonnement a été invoqué

notamment pour expliquer la densité d'énergie sombre, responsable de l'accélération de l'expansion cosmique.

Le multivers est certes une solution plausible pour expliquer cette densité. C'est peut-être même la seule piste dont nous disposons aujourd'hui. Cependant, nous n'avons aucun espoir de la valider un jour par l'observation. En outre, la plupart des raisonnements supposent que les équations de base de la physique restent valables partout, et que seules les constantes changent. Or si l'on considère le multivers dans son sens le plus général, ce n'est pas nécessairement le cas.

Cinquième argument : les constantes fondamentales concordent avec les prédictions des théories de multivers. Cet argument affine les précédents en suggérant que l'Univers n'est pas plus ajusté pour la vie que ce qui est strictement nécessaire. Les tenants de cette idée ont évalué les probabilités de diverses valeurs de la densité d'énergie sombre (voir l'encadré page 54). Plus cette valeur est élevée, plus elle est probable, mais plus l'univers résultant est hostile à la vie. La densité que nous observons devrait être juste à la limite du domaine de valeurs compatibles avec la vie, et il semble que ce soit le cas. Cet argument probabiliste



achoppe cependant sur le fait qu'il est nécessaire que le multivers existe pour calculer ce type de probabilité. Il est inapplicable s'il n'existe qu'un seul univers. En d'autres termes, on suppose *a priori* le résultat que l'on veut prouver. Ainsi, les probabilités sont un test de la cohérence du concept de multivers, mais pas une preuve de son existence.

Sixième argument : la théorie des cordes conduit à une grande diversité d'univers. La théorie des cordes, à l'origine censée être une théorie qui explique toute la physique connue, est devenue une théorie où presque tout est possible. Dans sa forme actuelle, elle prédit que de nombreuses propriétés essentielles de notre Univers sont de purs hasards. Si l'Univers est unique, ces propriétés sont difficilement explicables. Pourquoi les lois de la physique présentent-elles précisément ces propriétés qui permettent à la vie d'exister ? En revanche, si notre Univers n'est qu'un parmi d'autres, ces propriétés s'expliquent naturellement. Elles ne sont pas privilégiées ; ce sont simplement celles qui ont émergé dans notre région de l'Univers. Dans une autre région, si tant est que nous ayons pu y apparaître (la plupart sont inhabitables), nous aurions observé des propriétés différentes.

Cependant, la théorie des cordes n'est pas une théorie éprouvée. Ce n'est même pas une théorie complète. Si nous avions la preuve que la théorie des cordes est correcte, ses prédictions théoriques validées par l'expérience pourraient légitimement être utilisées pour étayer l'existence d'un multivers. Mais cette preuve fait défaut.

Septième argument : tout ce qui peut arriver arrive. En cherchant à expliquer pourquoi la nature obéit à certaines lois et pas à d'autres, certains physiciens ont imaginé que la nature n'avait en fait jamais fait un tel choix : toutes les lois concevables s'appliquent quelque part. L'idée est inspirée en partie de la mécanique quantique qui, comme Murray Gell-Mann l'a exprimé avec humour, veut que tout ce qui n'est pas interdit est obligatoire. Une particule emprunte tous les chemins possibles, et ce que nous voyons est la moyenne pondérée de toutes ces possibilités. Peut-être en va-t-il de même pour l'Univers entier : il existerait alors une superposition de tous les univers possibles, c'est-à-dire un multivers. Mais là encore, nous n'avons pas la moindre chance d'observer ces multiples réalisations. Pire, nous ne pouvons même pas savoir quelles sont les possibilités. Il manque un principe d'organisation

L'AUTEUR



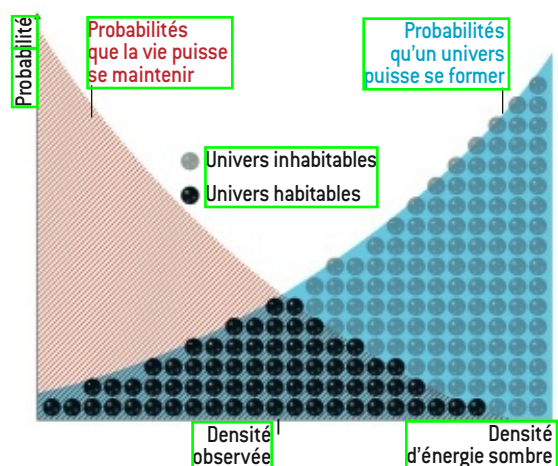
George ELLIS, cosmologiste, est professeur émérite à l'Université du Cap, en Afrique du Sud.

L'ARGUMENT DE L'ÉNERGIE SOMBRE

La densité d'énergie sombre est souvent invoquée comme preuve de l'existence du multivers. Le processus d'inflation éternelle donne naissance à des univers ayant des valeurs aléatoires de la densité d'énergie sombre. Peu d'entre eux ont une densité nulle ou faible tandis que la plupart ont une densité élevée (*région bleue*). Mais une densité d'énergie sombre trop élevée conduit à une expansion brutale, qui disperse la matière avant qu'elle n'ait pu former des structures

complexes. La plupart des univers sont ainsi inhabitables.

Or la densité d'énergie sombre de probabilité maximale parmi les densités compatibles avec la vie est précisément celle de notre Univers (*pic de la zone de recouvrement*) ! Cela justifierait la distribution des densités d'énergie sombre, et donc le multivers. Mais ce raisonnement est circulaire : il n'a de sens que si l'on fait au départ l'hypothèse du multivers.



ou un cadre permettant de déterminer ce qui est autorisé et ce qui ne l'est pas. M. Tegmark a par exemple proposé que toutes les structures mathématiquement possibles doivent être réalisées dans un domaine physique ou un autre. Cependant, nous n'avons pas la moindre idée du type d'univers que ce principe autorise, en dehors du nôtre. Et nous n'avons aucun moyen de vérifier l'existence ou la nature d'un tel principe organisateur. C'est peut-être une proposition séduisante, mais aussi une pure spéculation.

Un autre test consiste à rechercher des variations des constantes fondamentales, ce qui corroborerait l'hypothèse que les lois de la physique ne sont pas immuables. Certains chercheurs affirment avoir découvert de telles variations. La plupart des cosmologistes considèrent cependant que ces observations ne sont pas probantes.

Un troisième test s'appuie sur la forme de l'Univers observable : est-il sphérique (courbure positive), hyperbolique (courbure négative) ou plat (courbure nulle) ? Les scénarios de multivers prédisent en général que l'Univers n'est pas sphérique, parce qu'une sphère se referme sur elle-même, ce qui implique un volume fini. Néanmoins, ce test n'est pas totalement concluant. L'Univers situé au-delà de notre horizon pourrait prendre une forme différente de celle de la région observable ; en outre, tous les scénarios de multivers n'excluent pas une géométrie sphérique.

La topologie de l'Univers offre un meilleur test : est-il replié en boucle sur lui-même ? Si c'est le cas, l'Univers serait formé d'un volume de taille finie répété à l'infini, ce qui invaliderait certaines versions de la théorie de l'inflation, et en particulier les scénarios de multivers fondés sur l'inflation éternelle. Les observateurs ont cherché des motifs qui se répètent – ce qui prouverait que l'Univers forme une boucle sur lui-même – sans les trouver. Mais ce résultat négatif n'est pas pour autant un point en faveur du multivers.

Enfin, certaines des théories qui prédisent un multivers pourraient être réfutées. On pourrait par exemple trouver des preuves observationnelles allant à l'encontre de l'inflation éternelle, ou décou-

✓ BIBLIOGRAPHIE

P. Steinhardt, L'inflation cosmique en débat, *Pour la Science*, n° 406, août 2011, <http://bit.ly/408inflation>

A. Riazuelo, Un autre univers est-il possible ?, Dossier *Pour la Science*, n° 71, avril-juin 2011, <http://bit.ly/y4snRY>

A. Barrau et al., Multivers - Mondes possibles de l'astrophysique, de la philosophie et de l'imaginaire, Éditions *La ville brûle*, 2010.

A. Jenkins et G. Perez, La vie est-elle possible dans d'autres univers ?, *Pour la Science*, n° 390, avril 2010, <http://bit.ly/390jenkins>

M. Bojowald, L'Univers rebondissant, Dossier *Pour la Science*, n° 71 - avril-juin 2011, <http://bit.ly/w2b1ke>

M. Tegmark, De l'Univers au multivers, *Pour la Science*, n° 308, juin 2003.

Des tests empiriques

Parallèlement à ces arguments théoriques, les tenants du multivers ont aussi proposé divers tests empiriques. Voyons les principaux.

Le rayonnement du fond diffus cosmologique pourrait porter la trace d'univers alternatifs. Ce serait le cas si, par le passé, notre Univers était entré en collision avec un autre univers-bulle, tels ceux engendrés dans le scénario d'inflation éternelle. Dans le scénario de l'univers cyclique, des vestiges d'univers qui existaient avant le Big Bang pourraient aussi être décelables dans le fond diffus. De tels motifs dans le fond diffus seraient un élément de preuve en faveur du multivers. Certains cosmologistes ont même affirmé voir de telles signatures, mais ces annonces sont très débattues. En outre, beaucoup des multivers potentiellement possibles ne donneraient pas lieu à de tels indices observationnels. Ainsi, l'observation du fond diffus cosmologique ne permettrait de vérifier l'existence que de quelques classes particulières de multivers.

vrir une incohérence mathématique ou empirique qui contraigne à abandonner le paysage de la théorie des cordes. Le concept de multivers perdrait alors une bonne partie de son intérêt, sans que cela suffise à le rejeter totalement.

Trop de flexibilité

En fin de compte, les arguments en faveur du multivers ne sont pas très concluants. La raison fondamentale en est que cette idée est extrêmement flexible. C'est davantage un concept qu'une théorie bien définie. La plupart des scénarios mettent en jeu un assemblage d'idées différentes plutôt qu'un tout cohérent. Par exemple, le mécanisme de l'inflation éternelle, en soi, n'entraîne pas une physique différente dans chaque région du multivers; pour cela, il faut le coupler à une autre théorie spéculative. Cette combinaison n'a rien d'inévitable.

L'étape clef pour étayer l'hypothèse du multivers est une extrapolation du connu à l'inconnu, du vérifiable à l'invérifiable. On obtient des réponses différentes selon ce que l'on choisit comme extrapolation.

Puisque les théories du multivers peuvent expliquer pratiquement n'importe quoi, toute observation peut être conciliée avec une des variantes de multivers. Les différentes « preuves » proposées sont de nature théorique. Or il se trouve que jusqu'à présent, l'exigence centrale de toute démarche scientifique était la vérification par les observations. Si nous relâchons cette exigence de données tangibles, cela revient d'une certaine façon à abandonner le principe fondamental qui a fait le succès de la science au cours des siècles derniers.

Certes, une explication unifiée et cohérente d'un ensemble de phénomènes disparates a intrinsèquement plus de valeur qu'une collection d'arguments distincts pour chacun de ces phénomènes. Si ce cadre unificateur suppose l'existence d'entités non observables telles que le multivers, c'est un argument en faveur de celui-ci.

Mais la question est ici de savoir combien d'entités hypothétiques invérifiables sont nécessaires. Le cadre unificateur suppose-t-il d'introduire plus ou moins d'entités que le nombre de phénomènes à expliquer? Dans le cas du multivers, nous

supposons l'existence d'un nombre immense, voire infini, d'univers non observables pour expliquer un seul univers dont l'existence est avérée, le nôtre. Cela s'accorde mal avec le principe d'économie, ou « rasoir d'Ockham » qui stipule qu'il ne faut pas multiplier les éléments d'une théorie sans nécessité.

Les partisans du multivers ont un dernier argument: il n'y a pas de bonne alternative. Aussi déplaisante que soit la prolifération des univers parallèles, si c'est la meilleure explication, nous devrions l'accepter. Réciproquement, si nous abandonnons l'idée du multivers, nous avons besoin d'une alternative viable. Cette recherche d'alternatives dépend du type d'explications que nous sommes prêts à accepter. Les physiciens ont toujours espéré que les lois de la nature sont inévitables, c'est-à-dire que les choses sont telles qu'elles sont parce qu'il est impossible qu'elles soient autrement. Mais nous n'avons jamais réussi à le montrer. Il existe d'autres options. L'Univers pourrait être le fruit du hasard; il se trouve alors simplement qu'il a pris



LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur www.jardindesplantes.net, dans "l'agenda du jardin"

CONFÉRENCES

Cycle : le centenaire de la Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO)
Lundi 6 février — 18h
Les rapaces, de la guerre sans merci à la réhabilitation
M. Terrasse, responsable de la Mission Rapace de la LPO, président de la Vulture Conservation Foundation

Lundi 13 février — 18h
La connaissance des migrations d'oiseaux au service de la conservation
G. Jarry, ornithologue, expert du Muséum auprès de l'Union Européenne

Lundi 27 février — 18h
Il y a cinquante ans aux Saintes-Maries - Les zones humides
T. Salathé, biologiste, conseiller principal au secrétariat de la Convention sur les zones humides, Gland, Suisse et Michel Métais, ornithologue, directeur général de la LPO

MÉTIERS DU MUSÉUM

Dimanche 26 février — 15h, Entomologiste, C. Villemant

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

COURS PUBLICS

Cycle : La taxinomie
Judi 2 février — 18h
Nomenclature phylogénétique : une révolution en nomenclature biologique
M. Laurin, dir. de recherche, CNRS, Muséum

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



Un pari raisonnable

George Ellis invite dans cet article à la prudence vis-à-vis de l'idée de multivers. C'est une sage précaution dans la mesure où cette proposition est incontestablement spéculative. Il faut toutefois se méfier d'un excès de circonspection qui, au regard de l'histoire des sciences, pourrait se révéler plus dangereux qu'une audace responsable. Le « pari » du multivers me semble raisonnable, et ce pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, l'idée du multivers est réfutable, même s'il est impossible d'observer les autres univers. En effet, le multivers n'est pas un modèle – auquel cas il serait effectivement artificiel –, mais une conséquence, parmi d'autres, de modèles élaborés pour répondre à des questions précises en gravitation ou en physique des particules (relativité générale, puis théorie des cordes). Or ces modèles peuvent, en principe, être mis à l'épreuve en la-

boratoire ! Si les théories qui prédisent l'existence du multivers étaient invalidées par des expériences locales, les univers multiples qu'elles engendrent s'évaporerait avec elles. *A contrario*, si ces théories atteignaient un niveau de confiance suffisant pour être acceptées, il serait naturel de considérer sérieusement les autres univers qu'elles impliquent.

Il en va de même avec la relativité générale – pourtant archétype d'une théorie solide : ses nombreux succès sont assez convaincants pour qu'elle soit utilisée, sans que personne ne s'en offusque, pour décrire l'intérieur des trous noirs, alors qu'il est impossible de vérifier directement de telles prédictions.

La réfutation du multivers ne peut se faire que de façon probabiliste – avec un certain niveau de confiance, qui n'est jamais de 100 pour cent – puisque nous ne disposons que d'un seul échantillon

accessible : notre Univers. Mais il n'y a rien ici de très spécifique ; qu'il s'agisse d'incertitudes d'origine classique ou quantique, les théories sont toujours infirmées (ou corroborées) de façon statistique (la découverte d'une nouvelle particule par le LHC, par exemple, ne s'entend qu'avec une certaine probabilité de vraisemblance). La spécificité de la situation est quantitative – on connaît mal les probabilités en question –, mais pas qualitative.

Le multivers explique de nombreuses coïncidences : s'il existe une infinité d'autres univers avec des lois physiques différentes, il est plausible que nous nous trouvions dans un de ceux compatibles avec l'existence de structures complexes. Cet univers n'est évidemment pas représentatif de l'ensemble du multivers, de la même façon que la Terre n'est pas représentative de notre Univers en général. Le principe d'économie conceptuelle – le rasoir

d'Ockham – invite donc plutôt à accepter ce scénario qui est non seulement prédit par certaines de nos meilleures théories, mais qui permet aussi d'expliquer sans hypothèse supplémentaire l'étrange ajustement des lois de l'Univers à l'existence de la vie. Il y aurait un certain acharnement à compliquer les modèles pour « empêcher » l'émergence de ces univers alternatifs qui résolvent pourtant beaucoup de paradoxes !

De ce point de vue, faire l'hypothèse du multivers ne constitue pas une révolution dans la démarche scientifique. Il est vrai qu'elle pourrait néanmoins légitimer un cadre de pensée davantage spéculatif. Mais si aujourd'hui, comme souvent dans le passé, la physique voyait ses pratiques évoluer, y aurait-il nécessairement lieu de s'en offusquer ?

Aurélien Barrau
LPSC (CNRS-IN2P3), Grenoble

cette configuration particulière parmi d'autres. Autre possibilité : que les choses aient été destinées à être telles, un but ou un dessein sous-tendant leur existence. La science ne peut pas trancher, car ce sont des options métaphysiques, c'est-à-dire non scientifiques.

Les scientifiques ont proposé le concept de multivers pour résoudre des questions fondamentales sur la nature de l'Univers et de l'existence, mais, en fin de compte, ces questions restent sans réponse : elles se posent encore à propos du multivers. Par exemple, si le multivers existe, est-il le fruit de la nécessité, du hasard ou d'un dessein ? C'est une question à laquelle aucune théorie physique ne peut répondre, ni pour l'Univers ni pour le multivers.

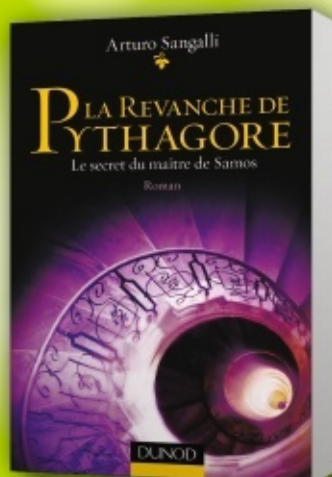
Pour avancer, nous devons nous en tenir à l'idée de la vérification empirique. Nous avons besoin d'une sorte de contact causal avec les entités que nous proposons ; sinon, il n'y a pas de limites à l'imagination. Ce lien peut être indirect. Si une entité n'est pas observable, mais absolument indispensable pour expliquer les propriétés d'autres entités qui, elles, sont effectivement vérifiées, on pourrait alors la considérer comme vérifiée. Il faut

cependant prouver de façon indiscutable que cette entité est absolument indispensable pour que l'échafaudage théorique tienne debout. Peut-on prouver que les univers parallèles inobservables sont indispensables pour expliquer l'Univers observable ? Et ce lien causal est-il essentiel et indéniable ?

Appeler les choses par leur nom

Aussi sceptique que je sois, je pense que la contemplation du multivers est une excellente occasion de réfléchir à la nature de l'Univers ainsi qu'à la méthode scientifique. Cette réflexion apporte des éclairages nouveaux et intéressants ; c'est donc un domaine de recherche productif. Pour explorer le concept de multivers, nous avons besoin de garder l'esprit ouvert, mais en restant prudents. Les univers parallèles peuvent exister ou non. La question n'est pas tranchée. Nous allons devoir vivre avec cette incertitude. Il n'y a rien de mal à faire des spéculations philosophiques fondées sur la science, et c'est exactement ce que sont les théories du multivers. Mais il faut appeler les choses par leur nom. ■

VARIEZ LES SAVOIRS AVEC DUNOD



A. SANGALLI

9782100565498 • 240 pages • **16,90 €**

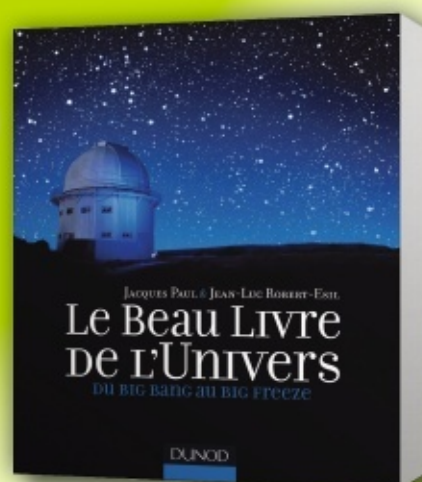
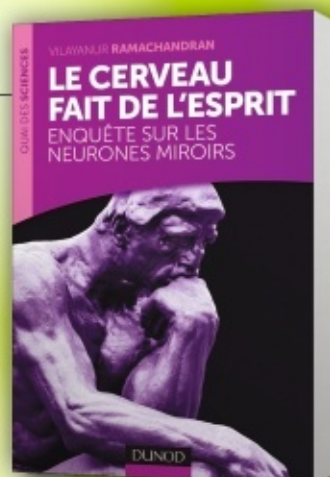
**On affirme que Pythagore n'a laissé aucun écrit.
Et si c'était faux ?**

**Rejoignez les deux héros de ce roman
et partez à la recherche du manuscrit perdu.**

V. RAMACHANDRAN

9782100543939 • 416 pages • **27,50 €**

**Découvrez comment l'un des plus
grands neurobiologistes envisage
ce qui fait le « propre de l'homme ».**



J. PAUL, J.-L. ROBERT-ESIL

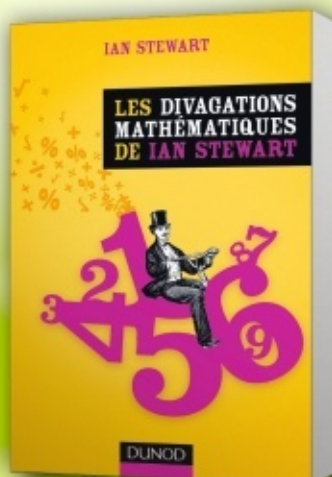
9782100567201 • 420 pages • **25,90 €**

**En 200 étapes magnifiquement
illustrées, déplacez-vous
le long de l'échelle du temps
et admirez les images du ciel
les plus étonnantes.**

DUNOD / LA RECHERCHE

9782100562992 • 176 pages • **16 €**

**Programmer des robots,
modéliser la chevelure humaine...
découvrez 32 situations
où « mathématiques »
rime avec « efficacité ».**



I. STEWART

9782100557967 • 272 pages • **18 €**

**Ian Stewart nous présente,
dans son style inimitable,
20 explorations mathématiques
passionnantes.**

Tous nos ouvrages sont disponibles en librairie

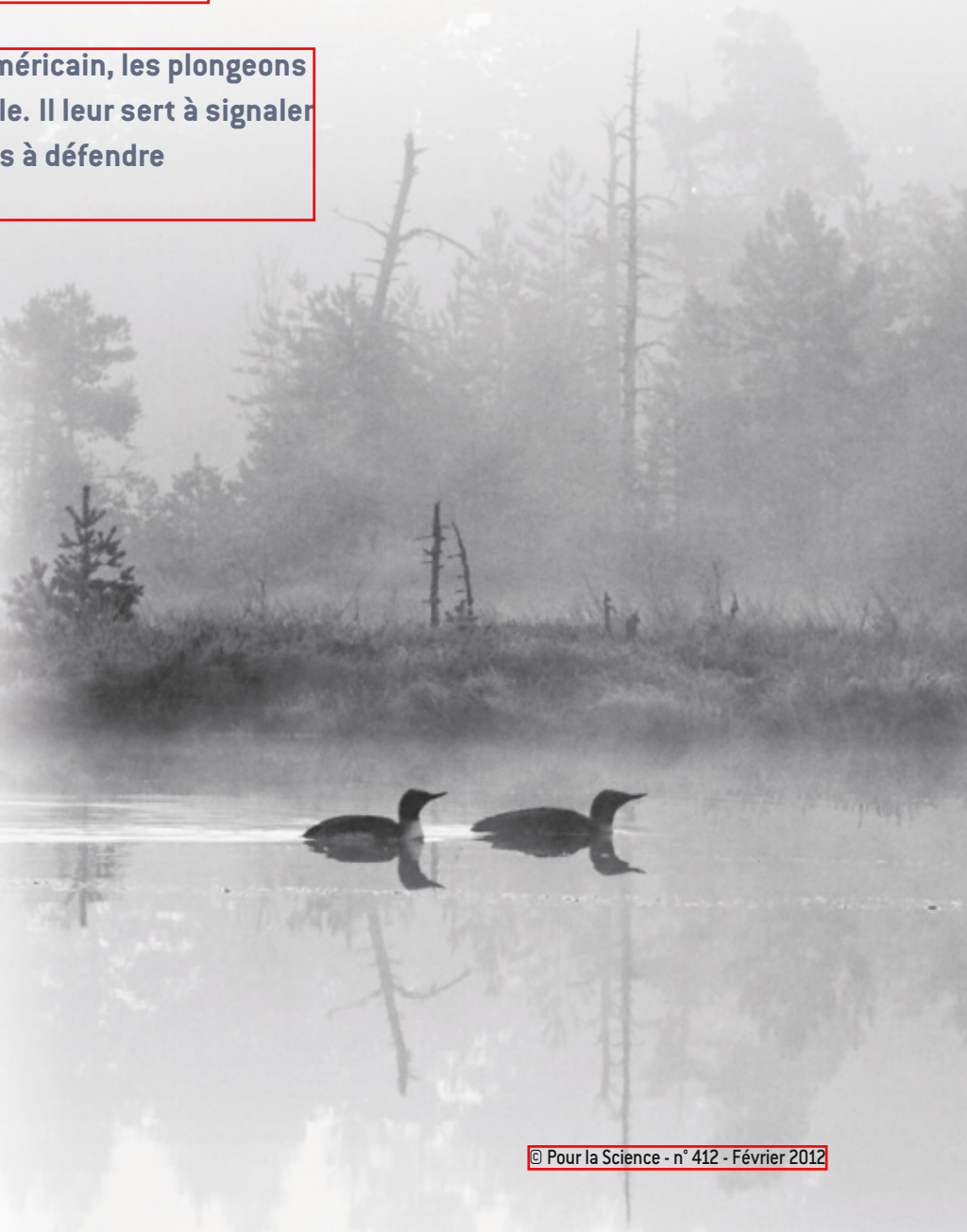
Les CRIS des plongeurs, des messages codés

Walter Piper, Jay Mager et Charles Walcott

Des oiseaux du grand Nord américain, les plongeurs huard, ont un cri remarquable. Il leur sert à signaler à leurs rivaux qu'ils sont prêts à défendre farouchement leur territoire.

Les visiteurs de la région des grands lacs américains et canadiens sont intrigués par le cri du plongeur huard, caractéristique de ces régions sauvages. Cet oiseau tire son nom des plongeurs spectaculaires qu'il fait pour attraper sa nourriture : il peut plonger à 12 mètres de profondeur et rester sous l'eau pendant plus d'une minute. Aussi gros qu'une oie, le plongeur huard (*Gavia immer*) atteint environ 1,50 mètre d'envergure. Cet oiseau est l'emblème de l'Ontario et du Minnesota et figure sur les pièces de un dollar canadien. Son aspect est tout aussi remarquable que son cri. Ses yeux, rouge vif, contrastent avec un plumage noir, et son cou est rehaussé d'un collier de rayures blanches. Ses ailes et son dos sont recouverts d'un motif blanc en damier. Le plongeur huard est prisé des photographes, qui le surprennent souvent en couple, s'occupant du nid ou des petits.

La femelle pond deux œufs par couvée, dont beaucoup sont victimes de pré-



dateurs (ratons laveurs, mouffettes) au cours des quatre semaines que dure l'incubation. Il est donc essentiel pour le plongeon de bien choisir son territoire et de s'établir dans des zones où les prédateurs sont peu nombreux. Quand des oisillons naissent et survivent, le territoire, apparemment propice au succès reproducteur, prend de la valeur aux yeux des congénères qui, dès lors, tentent de se l'approprier.

C'est surtout son cri qui caractérise le plongeon : les spécialistes qualifient cette vocalisation si particulière de iodle. Ces cris ont-ils un sens ? Pour le savoir, nous nous sommes intéressés à la dynamique de population des couples de plongeurs et à leur comportement quand ils défendent leur territoire. Après avoir rappelé ce que nous a appris l'observation des plongeurs, nous examinerons ce que nous avons tiré de l'étude de ces iodles. Nous verrons que c'est une « arme » importante : il transmet des informations aux intrus, notamment la force d'un oiseau et sa volonté de défendre son territoire.

David Evers et son équipe de l'Université du Western Michigan ont mis au point, en 1992, une méthode de baguage des plongeurs adultes et des oisillons permettant une étude plus systématique de la population. Nous avons poursuivi cette campagne de baguage et commencé à étudier, en 1993, le comportement du plongeon dans le comté d'Oneida, dans le Wisconsin. Il s'agit d'une centaine de lacs couvrant une zone quasi circulaire d'une cinquantaine de kilomètres de diamètre. Les couples de plongeurs qui vivent et se reproduisent sur ces lacs sont peu farouches, si bien que nous pouvons les approcher suffisamment pour les identifier grâce à leurs bagues colorées et noter leur comportement. En 18 ans d'étude, 1 040 plongeurs ont été marqués.

Ainsi, nous avons constaté que les couples de plongeurs doivent lutter pour protéger leur territoire, car des intrus tentent régulièrement de s'en emparer. Les couples sont stables, mais parfois, l'un des deux membres bagués (et un seulement) disparaît pour laisser sa place à un intrus

L'ESSENTIEL

✓ Pour optimiser ses chances d'avoir des petits, le plongeon huard tente de s'approprier le territoire d'un plongeon qui s'est reproduit avec succès.

✓ Certains vieux mâles préfèrent défendre leur territoire jusqu'à la mort que d'être expulsés et voir leurs chances d'avoir des petits diminuer.

✓ Le cri du plongeon sert à dissuader les prétendants au territoire. La fréquence dominante du cri indique la condition physique de l'oiseau et la répétition des syllabes, son agressivité.

© Marten Vanierssen/WWF/ICP/CRPIS

LES AUTEURS

Walter PIPER est professeur en géosciences et sciences de l'environnement à l'Université Chapman, à Orange, en Californie.

Charles WALCOTT est professeur émérite en neurobiologie et sciences du comportement à l'Université Cornell, à Ithaca, dans l'État de New York.

Jay MAGER est maître de conférences en biologie et en sciences paramédicales à l'Université de l'Ohio du Nord, à Ada.

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

non bagué. Le « disparu » était-il mort, victime d'une maladie ou d'un prédateur ? Non : nous le retrouvions généralement sur un lac proche, mais il portait des traces de blessures indiquant un combat ; l'oiseau s'était défendu, mais avait été chassé de son territoire.

Un visiteur importun

Nous avons peu d'informations sur ces intrus non bagués et sans territoire. Ces « vagabonds » faisaient quelques incursions sur les lacs de couples établis. Lorsque le vagabond se posait sur le lac, le couple « résident » se mettait immédiatement en état d'alerte. Les trois plongeurs adoptaient des comportements stéréotypés : mouvements de la tête, danses en cercle et plongeurs avec éclaboussement. Le plus souvent, les résidents faisaient fuir

les vagabonds, qui passaient une grande partie de leur temps à s'introduire régulièrement dans des territoires déjà occupés, puis repartaient.

Pourquoi les vagabonds agissaient-ils de la sorte ? Voler d'un lac à l'autre et interagir avec des couples résidents exigeaient une dépense énergétique si importante que ces oiseaux devraient en attendre un bénéfice. Nous avons supposé que les intrus mâles cherchaient à s'accoupler avec les femelles résidentes. Les vagabonds pourraient ainsi engendrer des jeunes sans avoir à les élever. Toutefois, nous avons rarement observé d'interaction entre des intrus mâles et les femelles des couples établis. Était-ce parce que l'accouplement se faisait rapidement, afin que le mâle résident ne le voie pas et n'interrompe pas les soins prodigués aux petits ? Pour la femelle, cela pourrait être une façon de bénéficier de bons gènes pour sa descendance. La littérature regorge d'exemples de « parenté extraconjugale », en particulier chez les oiseaux chanteurs. Pour étudier cette possibilité, nous avons prélevé des échantillons de sang de mâles, de femelles et de leurs oisillons, et effectué des tests de paternité. Les résultats furent sans appel : nous n'avons constaté aucun cas de parenté extraconjugale chez 58 jeunes issus de 47 familles. L'hypothèse de mâles s'introduisant dans des territoires pour tenter de copuler avec les femelles reproductrices devait être écartée.

Si les intrus n'étaient pas des mâles cherchant à s'accoupler avec les femelles résidentes, que cherchaient-ils ? La conquête territoriale semble être la seule motivation des vagabonds. En analysant leur comportement, nous avons découvert une relation entre la fréquence des intrusions et le succès reproducteur des couples vivant sur ce territoire. La fréquence des intrusions augmente de 60 pour cent dans les années suivant un succès reproducteur et la naissance d'oisillons chez un couple résident. Cette naissance indique un territoire propice à la nidification (avec peu de prédateurs par exemple). Les vagabonds ciblent ces « bons » territoires pour s'y établir et augmenter leurs chances d'avoir une descendance.

Nous avons distingué différentes stratégies d'acquisition d'un territoire. Les jeunes adultes âgés de trois à quatre ans et les vieux mâles acquièrent presque toujours leur territoire par « fondation », en s'établissant sur un lac inoccupé ou une



© Corbis/Icon/Walter Visuels/Unimedia

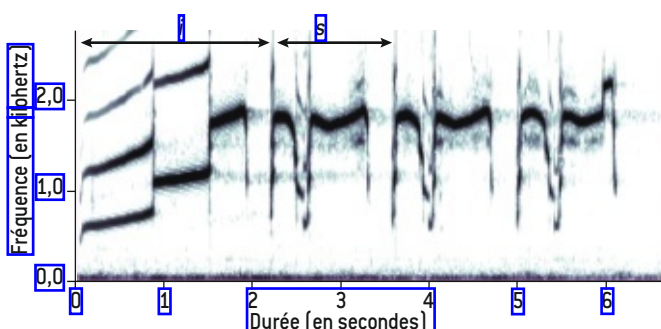
1. LE SUCCÈS REPRODUCTEUR des plongeurs – le nombre de petits par couvée – dépend du site où le nid est installé, et qui doit être à l'abri des prédateurs.



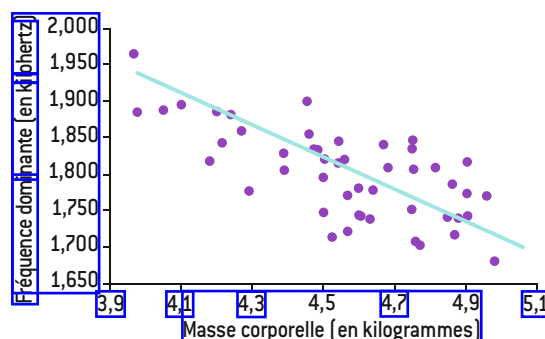
Van Sinsburg

2. LES PLONGEURS INSTALLENT LEUR NID PRÈS DE L'EAU. En cas de danger, il leur suffit de glisser du nid et de disparaître sous la surface de l'eau. Ce plongeur baisse la tête pour essayer de se dissimuler au regard du photographe.

Pour dissuader les vagabonds de venir contester son territoire, le plongeon mâle communique par son cri un certain nombre d'informations. Il indique en particulier sa condition physique et sa motivation à défendre son territoire, surtout si le site est propice à la nidification. Ces informations sont codées par différents aspects du cri : la fréquence dominante est un indice de la taille du plongeon et la répétition d'une certaine syllabe, un indice de son agressivité. Le plongeon mâle cherche par son cri à éviter un combat contre un rival qui pourrait, dans certains cas, le tuer.



Ce sonagramme montre les fréquences du iodle d'un plongeon mâle. Le cri commence par une introduction (*i*) suivie d'une syllabe (*s*) répétée trois fois. Un plongeon peut être identifié à partir des caractéristiques de son cri : la durée de l'introduction, les fréquences dominantes et les pauses entre les syllabes.



La fréquence dominante du iodle indique le poids du plongeon. Plus le mâle est léger, plus son cri est aigu et plus il apparaît vulnérable. Mais il compense cette révélation en signalant son agressivité.

partie inoccupée d'un vaste lac, et s'accouple avec une femelle disponible. Les mâles, à partir de l'âge de cinq ou six ans, commencent à se battre pour conquérir des territoires occupés. Les femelles sont susceptibles, à tout âge, d'acquiescer des territoires en s'établissant sans conflit dans un territoire inoccupé ou en expulsant de force une résidente.

Le suivi des individus bagués a permis d'observer l'évolution de la condition physique des plongeurs, en particulier leur poids en fonction de l'âge. Les mâles ont une masse corporelle relativement faible à l'âge de quatre ou cinq ans. Elle augmente ensuite régulièrement jusqu'à l'âge de dix ans, puis diminue. Chez la femelle, le poids évolue très peu. En rapprochant cette observation et le mode d'acquisition d'un territoire, nous avons montré que les jeunes ou vieux mâles évitent les confrontations, car ils sont moins robustes que les mâles adultes. Ces derniers tirent profit de leur condition physique pour acquiescer un bon territoire par la force. Les mâles

ont raison d'éviter la confrontation si leur condition n'est pas optimale : environ un tiers des combats entre mâles (mais pas entre femelles) pour acquiescer un territoire se termine par la mort d'un des deux combattants, presque toujours le résident d'origine !

Défendre son territoire jusqu'à la mort

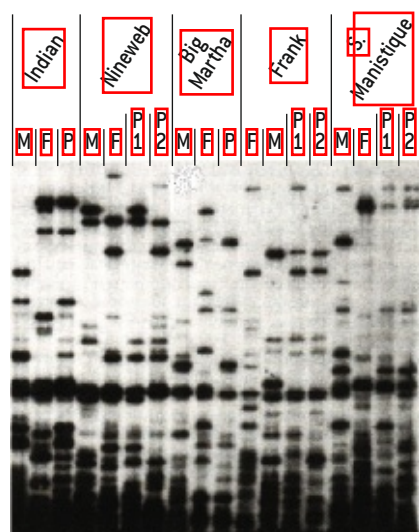
Cette observation de combats à mort nous a surpris. Ce phénomène existe chez des espèces à courte durée de vie, telles les guêpes et les araignées, quand l'individu n'a que rarement l'occasion de se reproduire et est prêt à se battre jusqu'à la mort pour la saisir. Les combats à mort semblent très rares chez des espèces ayant une longue espérance de vie. Les plongeurs vivent souvent plus de 20 ans. Dès lors, pourquoi s'engager dans un combat qui pourrait leur coûter la vie ? Un territoire peut-il avoir une si grande valeur qu'un mâle doive affronter la mort pour le conserver ?

Pour comprendre cet attachement des mâles au territoire, intéressons-nous au comportement de nidification. Quand un couple réussit à avoir des petits, il a tendance à réutiliser ce site propice l'année suivante. Quand un couple échoue, il change généralement de nid. Cette règle du « je gagne, je reste ; je perds, je vais ailleurs » est répandue chez les vertébrés. Nous avons montré qu'elle améliore le succès de la nidification chez les plongeurs. C'est le mâle qui décide du lieu de nidification, qu'il soit familier ou nouvel arrivant sur ce territoire. La bonne connaissance de l'espace territorial permet à un mâle d'augmenter ses chances de 41 pour cent d'avoir des petits par rapport à ses chances sur un territoire inconnu. Ainsi, un mâle résident a intérêt à garder son territoire et à être prêt à le défendre. S'il est expulsé, son succès reproducteur diminue. Un intrus connaît la qualité du territoire qu'il convoite, mais ne sait pas précisément où établir le nid pour assurer son succès. C'est pourquoi l'engagement du mâle résident



3. LES PATTES DU PLONGEON sont repoussées vers l'arrière du corps ; elles facilitent la nage en profondeur pour attraper du poisson. Mais cette

anatomie rend difficile l'envol de l'oiseau. On distingue sur ces photographies les bagues accrochées aux pattes pour identifier les individus.



M = génome du mâle
F = génome de la femelle
P = génome du petit (1 ou 2)

4. DES TESTS DE PATERNITÉ ont été pratiqués sur de l'ADN d'oiseaux résidents et de leurs poussins (ici, on présente les résultats pour cinq couples). Les auteurs voulaient savoir si les plongeurs vagabonds s'accouplaient discrètement avec les femelles résidentes. L'étude a montré que tous les jeunes sont issus des couples résidents. Le vagabond ne tente pas de s'accoupler, mais de conquérir le territoire occupé.

dans le combat est si important et aboutit parfois à la mort.

Toutefois, cette augmentation du succès reproducteur constitue-t-elle un enjeu suffisant pour pousser un mâle à risquer sa vie ? Après tout, même un mâle expulsé et installé sur un nouveau territoire a une chance acceptable d'avoir des petits. Pourquoi risquer la mort ?

L'hypothèse la plus probable est celle du « desperado ». Les mâles âgés percevraient la diminution de leur condition physique et seraient prêts à risquer leur vie pour rester un ou deux ans de plus sur un territoire qu'ils connaissent plutôt que de tout recommencer sur un territoire étranger. Nous sommes encore en train de rassembler des données sur des très vieux mâles afin de tester cette hypothèse du « desperado ». Les 18 années de données accumulées ne sont pas encore suffisantes pour confirmer ou infirmer notre hypothèse.

Le cri du plongeon : une carte d'identité

Le iodle, cri du mâle résident, présente une phrase introductive dont la tonalité s'élève progressivement, suivie d'une série de « syllabes répétées », comprenant deux notes brèves, modulées en fréquence. Les études sur plusieurs saisons de reproduction ont montré que les iodles de chaque mâle sont uniques en termes de durée, de fréquences et de modulation de fréquence. La variabilité interindividuelle et la complexité acous-

tique de chaque iodle suggèrent que ce cri serait une signature de l'identité de chaque mâle, et que ces paramètres acoustiques véhiculent beaucoup d'informations pour les autres plongeurs.

Le mâle émet des iodles quand un intrus se pose sur son territoire. Au premier abord, il est vraisemblable que ce cri transmet des informations sur la capacité du mâle à défendre son territoire. Le plongeur communique-t-il ainsi sa condition physique et sa motivation à protéger son bien ? En annonçant qu'il est en pleine forme, le mâle cherche à éviter les risques associés à un combat.

Les iodles livrent des informations sur la capacité de lutte du plongeur. Cette information est codée dans la fréquence dominante du iodle, qui est la fréquence émise avec la plus forte amplitude. La valeur grave ou aiguë de cette fréquence dépend du poids des individus. Les mâles plus lourds ont une fréquence dominante plus grave. Le iodle d'un plongeur qui maigrit devient plus aigu et, inversement, s'il grossit, son cri devient plus grave. Aussi, un plongeur, qui reconnaît le cri d'un mâle déjà croisé l'année précédente, saurait si cet oiseau est en meilleure ou en moins bonne condition physique que lui.

Les autres plongeurs perçoivent-ils réellement ces informations en écoutant le signal ? Afin de le savoir, nous avons « joué » trois versions du iodle d'un plongeur étranger à des individus qui se sont appropriés un territoire : le iodle original ; le iodle original dont les fréquences ont été abaissées de 200 hertz (vers le

La beauté est-elle honnête ?

Le « plaisir esthétique » qu'une femelle éprouve lors des parades sexuelles d'un mâle détermine-t-il son choix de partenaire ? C'est ce qu'affirmait sans ambiguïté la théorie de la sélection sexuelle forgée par Charles Darwin voici 150 ans. Cette thèse confiait aux femelles et à leurs sens du beau un rôle essentiel lors du choix de partenaires.

Mais des recherches récentes ont relativisé la portée du goût esthétique des femelles, et déplacé l'accent sur le rôle de la valeur reproductrice des mâles. Le beau a alors cédé le pas à l'utile. C'est ainsi qu'est apparue la théorie des signaux « honnêtes », qui s'inscrit dans une perspective « pragmatique » de la théorie évolutive, supposant que les choix des femelles visent à sélectionner des partenaires de « qualité ». Résumons cette théorie : pour séduire une femelle, un mâle doit produire des signaux acoustiques dénotant qu'il est un partenaire compétent. Par conséquent, afin de permettre à une femelle de l'identifier et de le convoiter, il doit émettre des signaux « honnêtes », autrement dit coûteux en apprentissage, énergie et habileté, et présentant des caractéristiques qu'un mâle de faible qualité ne saurait contrefaire.

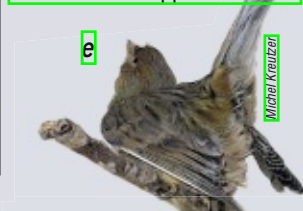
Chez un oiseau chanteur, le canari (*Serinus canaria*), nous avons montré avec l'équipe de recherche du Laboratoire d'éthologie et cognition comparées, à l'Université Paris Ouest, que toutes les femelles préfèrent dans le chant des mâles des passages particuliers, les phrases A. Ces phrases, qu'avec Eric Vallet nous avons qualifiées de « sexy », sont difficiles à chanter, car les séquences sonores qui les composent présentent à la fois une large bande de fréquences et une cadence de répétition très rapide. Il s'agit de deux traits difficiles à produire simultanément, une telle conjonction nécessitant l'étroite coordination des bronches droite et gauche de la syrinx, l'organe du chant chez les oiseaux. De plus, les deux hémisphères cérébraux impliqués dans la production du chant

doivent coordonner leurs activités. Ces performances motrices sont comparables au travail d'un jongleur qui coordonnerait rapidement et de manière asynchrone ses mains droite et gauche.

Des séquences de chant ont pu être artificiellement synthétisées en combinant des cadences et des largeurs de fréquences, de façon à produire des phrases encore plus « sexy » que les phrases naturelles. À l'écoute de ces superstimulus, qui se situent en dehors des capacités habituelles de vocalisation des canaris mâles, les femelles produisent alors des postures de sollicitation à l'accouplement en nombre bien supérieur à celui que l'on mesure en réponse à des signaux naturels.

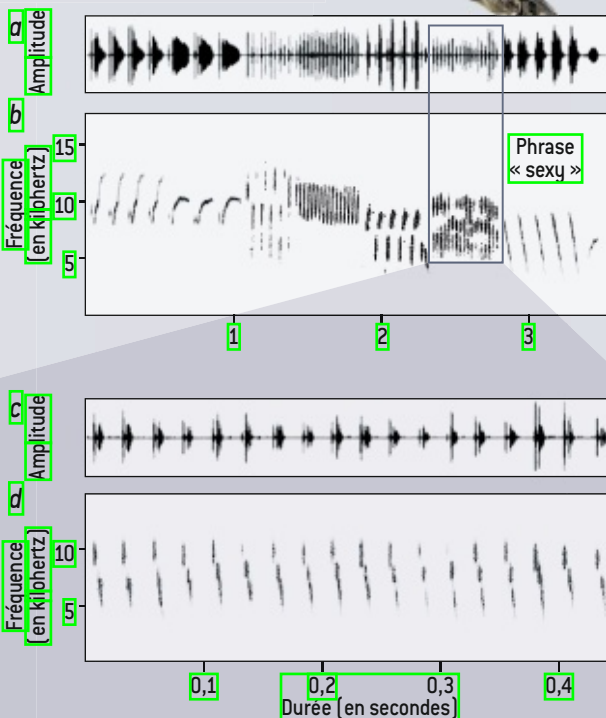
Par ailleurs, on sait que chez l'homme et l'animal certains signaux sont plus excitants que d'autres, et stimulent des centres nerveux dits de la récompense, qui font

éprouver du plaisir. Comme certains théoriciens du comportement animal l'avaient souligné, les animaux recherchent et répètent ce qui leur est agréable. Ce qu'ils éprouvent contrôle leur motivation à agir. Il a été récemment montré que ces circuits sont activés au cours d'événements sociaux tels que le choix de partenaires ou la production de chants chez l'oiseau. Ainsi, les comportements d'une femelle qui entend ses signaux préférés sont influencés par cette écoute. L'important, pour les mâles, serait alors de stimuler au mieux les femelles par leurs vocalises afin d'activer leur circuit de la récompense. La théorie du biais sensoriel développée



par Michael Ryan, de l'Université du Texas, à Austin, stipule qu'au cours de l'évolution les femelles ont acquis une sensibilité « latente » à des particularités acoustiques qui n'avaient jamais été produites dans les vocalises des mâles. Mais s'il advenait que des mâles se mettent à produire des signaux stimulant cette sensibilité latente, ils ont d'emblée un avantage sur les autres. Nous savons bien que nous sommes parfois immédiatement charmés par des mélodies, saveurs ou formes dont nous ignorions jusqu'alors l'existence. Dans ce cas, le nouveau signal exploite en quelque sorte notre réceptivité latente, notre biais sensoriel. De plus, des études s'inspirant du biais sensoriel montrent que l'enjeu ne serait pas que les femelles choisissent les « meilleurs » mâles, mais ceux qui les stimulent le mieux. Dès lors, la question est de savoir si ce qui plaît est obligatoirement utile ou coûteux à produire.

Que le « plaisir esthétique » éprouvé à l'écoute d'un chant conduise une femelle à choisir tel ou tel mâle comme partenaire, voilà qui rejoint la thèse darwinienne. Au cours de l'évolution, ce qui paraît agréable a dû servir de base pour construire la catégorie subjective du beau. Faire des animaux des « êtres désirants » constitue une étape qui aurait sans doute convenu à Darwin, pour qui : « L'appariement des oiseaux n'est pas laissé au hasard, les mâles qui ont le plus de chances d'être acceptés sont, dans des circonstances normales, ceux qui parviennent le mieux à séduire ou à exciter les femelles par leurs charmes variés ». Éthologie et neurosciences permettront de déterminer si les chants qui séduisent sont toujours ceux qui sont révélateurs de l'aptitude des mâles, et alors nous saurons si la beauté est toujours honnête.



UN CHANT DE CANARI est composé de plusieurs phrases variées (oscillogramme en a et sonagramme en b, qui indiquent respectivement l'amplitude et la fréquence du signal en fonction du temps). Une « phrase sexy » a été agrandie : elle met en évidence les deux éléments émis sur une grande largeur de fréquences et à une cadence élevée (c et d). Les femelles, séduites par un tel chant, adoptent des postures de sollicitation à l'accouplement (e).

Michel Kreutzer, professeur d'éthologie au Laboratoire d'éthologie et cognition comparées, Université Paris Ouest, Nanterre-La Défense



5. CE COMBAT ENTRE DEUX MÂLES a donné lieu à une poursuite à la surface de l'eau qui a duré 16 minutes. Environ 30 pour cent des combats se terminent par la mort du plongeon résident qui défend un site de nidification propice à la reproduction.

✓ BIBLIOGRAPHIE

W. H. Piper *et al.*, Fatal battles in common loons : a preliminary analysis, *Animal Behaviour*, vol. 75, pp. 1109-1115, 2008.

W. Searcy et S. Nowicki, Un chant d'oiseau honnête, *Pour la Science*, n° 370, août 2008.

J. N. Mager *et al.*, Male common loons, *Gavia immer*, communicate body mass and condition through dominant frequencies of territorial yodels, *Animal Behaviour*, vol. 73, pp. 683-690, 2007.

C. Walcott *et al.*, Changing territories, changing tunes : male loons, *Gavia immer*, change their vocalizations when they change territories, *Animal Behaviour*, vol. 71, pp. 673-683, 2006.

J. Panksepp, Affective consciousness : core emotional feelings in animals and humans, *Consciousness and Cognition*, vol. 14, pp. 30-80, 2005.

E. Vallet et M. Kreutzer, Female canaries are sexually responsive to special song phrases, *Animal Behaviour*, vol. 49, pp. 1603-1610, 1995.

grave) ; le iode original dont les fréquences ont été augmentées de 200 hertz (vers l'aigu). Les trois signaux sont inclus dans la gamme de fréquences des iodles. Nous avons découvert que les mâles protégeant leur territoire répondent plus rapidement et de façon plus agressive aux iodles décalés vers les fréquences graves. Cela suggère que les plongeurs considèrent les iodles de basses fréquences comme plus menaçants. Toutefois, nous ignorons encore si les plongeurs se souviennent d'une année à l'autre de ces cris. Si tel est le cas, ils pourraient ainsi repérer le territoire des plongeurs affaiblis et tenter de les expulser.

Ces signaux qualifiés d'honnêtes qui indiquent la taille de l'individu ne sont-ils pas défavorables aux plongeurs les plus petits ? Leur cri ne révèle-t-il pas leur petite taille et leur faiblesse ? Pourtant, les petits mâles iodlent aussi souvent que les grands. Quel est donc l'avantage qui compense cet inconvénient ?

De fait, le iode contient d'autres informations que l'identité et le poids. Le nombre de syllabes répétées varie beaucoup d'un iode à l'autre pour un mâle donné, et servirait à communiquer l'agressivité. Nous avons observé que les mâles émettent plus de syllabes répétées quand les intrus se rapprochent. Nous avons alors réalisé une expérience qui simulait l'intrusion d'un mâle vagabond sur un territoire défendu par un couple de reproducteurs. Comme nous nous y attendions, les mâles résidents répondaient plus rapidement et avec plus de iodles et de vocalisations aux iodles étrangers à qua-

tre ou sept syllabes répétées qu'aux iodles ne comportant qu'une seule syllabe. Le nombre de syllabes répétées est considéré par les plongeurs comme un signal agressif. Un petit mâle doit ainsi iodler afin de signaler son agressivité, même si son chant trahit sa petite taille.

Un territoire amélioré

Nous avons mis au point une autre expérience sur la « motivation agressive », dans laquelle nous avons amélioré la qualité du territoire d'un mâle. Nous avons construit une plate-forme flottante de un mètre carré, constituée de rondins de bois, et placée à plus de 20 mètres de la rive où les plongeurs peuvent faire leur nid. Nous avons montré que ces plates-formes augmentent le succès reproducteur de 69 pour cent, car les prédateurs sont maintenus à distance des œufs. Les mâles se trouvant sur de tels territoires émettent des iodles plus longs, comparés à leurs propres cris émis les années antérieures (en l'absence de plates-formes) : ils renforcent ainsi la défense de leur territoire dont la valeur a augmenté. Cela confirme que les iodles servent à communiquer un signal agressif.

Le marquage des oiseaux nous a permis de suivre les mâles qui se déplaçaient d'un territoire à un autre. Cela a révélé un aspect inattendu et déconcertant de leur iode : il change quand un mâle établit son nid sur un autre site ! Son cri diffère autant que faire se peut de celui de l'ancien résident. Cette découverte curieuse appuie l'hypothèse selon laquelle le mâle modifie son iode pour proclamer qu'il est nouveau sur le territoire et qu'il ne doit pas être confondu avec le mâle résident précédent.

À la suite de la capture et du marquage systématiques des animaux que nous avons étudiés, nous comprenons mieux comment les plongeurs acquièrent leur territoire de reproduction et le défendent. Le marquage a révélé que les conquêtes de territoires sont fréquentes et que les mâles réussissant à s'approprier un territoire ont une bonne condition physique. Nous avons montré que les iodles trahissent la taille de l'oiseau et sa motivation agressive, et que les mâles qui prennent possession d'un nouveau territoire changent de iode. Un marquage plus systématique de ces oiseaux nous permettra de mieux décrire cette espèce et ses comportements. ■

ACTUELLEMENT EN KIOSQUE



Dossier Pour la Science n° 74

Les mathématiques ont leurs sept merveilles ! Il s'agit des sept problèmes du millénaire, mis à prix à un million de dollars chacun par l'Institut Clay de mathématiques en 2000. Mais l'intelligence des mathématiciens est aussi mise à l'épreuve par bien d'autres problèmes, tels ceux de Hilbert. Découvrez dans ce numéro comment ces énigmes orientent l'avenir de la discipline ouvrant la voie à de nouvelles connaissances fondamentales.

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

Cerveau & Psycho n° 49

Grâce aux progrès de l'imagerie cérébrale, l'architecture du cerveau se précise. Cette exploration – tout aussi passionnante que celle de l'Univers – sous-tend des enjeux de taille : comprendre la naissance de la pensée et l'émergence de la conscience. Au sommaire également : Les images subliminales influent-elles sur nos comportements ? Comment vaincre sa phobie du dentiste ?

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



Format classique ou pocket



Format classique ou pocket

L'Essentiel Cerveau & Psycho n° 8

Aujourd'hui, d'innombrables résultats de recherche confirment que les enfants – mais aussi les adolescents et les adultes – soumis à la violence (images, jeux vidéo, etc.) sont eux-mêmes plus violents, moins sensibles aux violences faites à autrui. Sociologues, psychologues, psychiatres cherchent à identifier les causes de la violence pour mieux la combattre.

Parution de novembre 2011/janvier 2012 – Prix : 6,95 €

POUR LA
SCIENCE

Un bras dans la GLACE

Colleen Fitzpatrick

De nouvelles techniques d'analyse d'empreintes digitales et d'ADN ont permis d'identifier le propriétaire d'un bras retrouvé 60 ans après une catastrophe aérienne.

L'ESSENTIEL

- ✓ Plus d'un demi-siècle après une catastrophe aérienne ayant causé la mort de tous les passagers, on a retrouvé un bras et une main sur le lieu de l'accident.
- ✓ Les premières analyses des empreintes digitales et de l'ADN de ces restes humains n'ont pas permis d'identifier l'individu correspondant.
- ✓ Des chercheurs ont fini par y parvenir après avoir mis au point de nouvelles techniques, qui pourraient être utilisées pour identifier des victimes de catastrophes ou des soldats morts au combat.

Le 12 mars 1948, le vol numéro 4422 de la *Northwest Airlines* s'écrase sur le mont Sanford, situé dans une chaîne de montagnes isolée à l'Est de l'Alaska. Les 24 passagers et les six membres d'équipage sont tués sur le coup. Les débris, inaccessibles pour les équipes de secours, sont vite recouverts de neige, puis emprisonnés dans la glace.

Les efforts pour les récupérer sont restés vains jusqu'à l'intervention, en 1999, de Kevin McGregor et Marc Millican, deux anciens pilotes de l'armée américaine. Les deux hommes, passionnés par l'histoire de l'aviation, ont montré que le glacier avait reculé, sans doute assez pour avoir libéré l'appareil. Munis des autorisations nécessaires pour rapporter d'éventuels débris, ils sont partis à la recherche de l'épave. Après une ascension difficile, ils ont découvert des restes d'avion éparpillés, ainsi qu'un bras et une main gauches pris dans la glace. Dès lors, ils se sont donné pour mission d'identifier le propriétaire de ces restes.

Leur initiative a débouché sur une collaboration inhabituelle entre des experts en

analyse d'ADN, en empreintes digitales et en généalogie scientifique – collaboration à laquelle j'ai pris part, en tant que spécialiste de ce dernier domaine. Nous avons fini par déterminer à qui appartenaient les restes découverts, et ce succès sera sans doute utile dans bien d'autres cas : certaines des techniques mises au point au cours de l'enquête pourraient aider à identifier les victimes de grandes catastrophes et les soldats morts à la guerre. Voyons comment cette enquête s'est déroulée.

Revers initiaux

La découverte de restes humains a entraîné l'intervention des forces de l'ordre d'Alaska. Un policier a libéré le bras de la glace et l'a transporté jusqu'au laboratoire du médecin légiste d'Anchorage, à environ 320 kilomètres de là. Après avoir relevé les empreintes digitales, le légiste a pris les dispositions nécessaires pour assurer une bonne conservation du membre.

Celui-ci ne présentait aucun signe distinctif, tels un tatouage ou une particula-

rité anatomique, qui aurait permis une identification rapide. Dès lors, seules des analyses d'empreintes digitales et d'ADN pouvaient livrer l'identité du propriétaire. Mais après trois ans d'efforts infructueux, les spécialistes ont conclu à l'inefficacité des méthodes traditionnelles. En outre, ils n'avaient pas réussi à collecter toutes les empreintes digitales de passagers : ils ne disposaient que de 22 fiches pour les 30 personnes décédées. Pour huit victimes, dont les six membres d'équipage, aucune empreinte digitale de référence n'était disponible. Et même avec une série complète d'empreintes de référence, la main était si abîmée que le bureau de médecine légale d'Alaska aurait été incapable d'identifier la victime.

L'analyse d'ADN n'a pas été plus performante. Le bureau de médecine légale

avait envoyé un échantillon de tissu du bras à un laboratoire, dont la conclusion fut sans appel : le matériau biologique était « dégradé à un point tel que les brins d'ADN étaient trop petits pour fournir des résultats ».

En 2002, K. McGregor et M. Millican ont cherché un spécialiste de l'ADN ancien. Ils ont d'abord recouru à Ryan Parr, de la Société *Genesis Genomics* (aujourd'hui *Mitomics*) puis, en 2006, à Odile Loreille, du Laboratoire d'identification par l'ADN des forces armées (AFDIL) situé à Rockville, dans le Maryland. Elle analyse l'ADN extrait de fossiles. Plutôt que d'étudier l'ADN du noyau cellulaire, elle se fonde sur celui des mitochondries, les organites produisant l'énergie des cellules. Comme l'ADN mitochondrial est beaucoup plus abondant que l'ADN nucléaire, il aug-

mente les chances d'identifier des restes humains très dégradés.

O. Loreille a manifesté un intérêt immédiat pour le projet. Elle avait rejoint l'AFDIL pour identifier les restes de plus de 800 soldats américains, tombés pendant la guerre de Corée et enterrés pour la plupart à Hawaï, au Mémorial américain du Pacifique. Le formol utilisé pour conserver les corps avait endommagé leur ADN, et elle espérait mettre au point de nouvelles techniques, qu'elle pourrait ensuite exploiter dans son projet, pour

1. LE BRAS dégagé des décombres du vol 4422 de la *Northwest Airlines* a nécessité neuf ans d'études pour que l'on identifie son propriétaire. Les causes de l'accident sont encore inconnues. L'avion avait dévié de sa route et s'est écrasé sur la montagne.



identifier le propriétaire du bras découvert dans la glace.

O. Loreille a utilisé de l'ADN extrait du tissu osseux du bras, car il est généralement mieux protégé des contaminations par l'environnement et par les manipulations que celui des tissus mous (peau, muscles, etc.). Ainsi, on s'est servi d'ADN osseux pour identifier les victimes du tsunami de 2004 en Thaïlande. Peu de temps auparavant, O. Loreille avait élaboré une méthode pour séparer efficacement l'os des résidus de formol. Toutefois, même cette méthode avait peu de chances de fournir assez d'ADN. La généticienne a alors développé un procédé de déminéralisation, consistant à dissoudre totalement la matrice osseuse : de la sorte, elle a récolté juste assez d'ADN mitochondrial pour une analyse.

Bien sûr, l'extraction de l'ADN ne représentait que la moitié du chemin. Pour que l'on puisse identifier la personne dont on avait retrouvé le bras, il fallait comparer l'ADN mitochondrial à celui d'un parent de chacun des disparus. Comme l'ADN mitochondrial est transmis aux enfants uniquement *via* la mère, tout parent masculin ou féminin d'une lignée matrilinéaire – un cousin dont la mère serait la sœur de la mère du sujet, par exemple – conviendrait. La nécessité d'un lien matrilinéaire a compliqué la recherche de parents éloignés, car les femmes changent souvent de nom de famille à leur mariage. C'est à ce

stade que l'on a requis mes compétences de généalogiste scientifique, afin de retrouver des parents en mesure de fournir de l'ADN mitochondrial.

Cette recherche étant difficile, était-il possible de ne l'effectuer que pour quelques-uns des disparus ? En d'autres termes, pouvions-nous éliminer certaines possibilités par d'autres moyens ? Pour le savoir, O. Loreille s'est tournée en 2007 vers Ted Robinson, professeur assistant en criminalistique à l'Université George Washington. Il a effectué une nouvelle analyse des empreintes digitales, grâce à des techniques améliorant la qualité des empreintes dégradées – nous y reviendrons.

Présentons d'abord les principes de l'identification par empreintes digitales. Une telle identification se fonde sur trois types de détails, du plus grossier au plus fin (*voir la figure ci-dessous*). Le premier prend en compte le dessin général des crêtes (les lignes des empreintes, qui permettent aux doigts d'adhérer aux objets). Plusieurs catégories de dessins existent, chaque doigt n'en présentant qu'une : le faisceau de crêtes peut par exemple former une boucle, orientée vers la droite ou vers la gauche. Les détails du deuxième type sont nommés minuties. Il s'agit de points singuliers, ou points de Galton, nommés ainsi en l'honneur de sir Francis Galton, dont les travaux ont jeté les bases du système moderne de dactyloscopie

(l'étude des dessins digitaux) à la fin du XIX^e siècle. Les minuties comprennent par exemple les points où une ligne bifurque ou s'arrête. Le troisième type, le plus fin, décrit les caractéristiques des lignes individuelles, telles leur épaisseur, leur convexité, leurs irrégularités... Il précise en outre les emplacements des pores sudoripares.

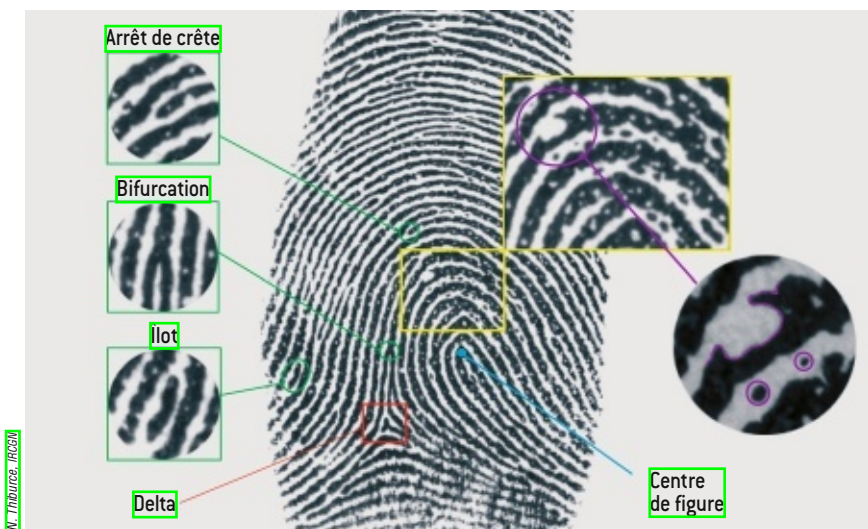
La comparaison des détails du premier type entre deux séries d'empreintes digitales suffit pour affirmer qu'elles ne correspondent pas ; elle n'est toutefois pas assez spécifique pour une identification, que seuls les détails des deux autres types autorisent.

Dans notre cas, la couche épidermique de la peau n'était plus présente sur les doigts – elle s'était détachée depuis que le bras avait été extrait de la glace –, et le derme sous-jacent était presque lisse. T. Robinson a alors tenté de restituer sa souplesse à la peau en la plaçant dans un bain réhydratant, une méthode nommée « restauration des empreintes digitales » et employée notamment pour l'identification des victimes de l'ouragan Katrina en 2005.

Faire réapparaître les empreintes

Les résultats ont été plus que satisfaisants : les détails des crêtes sont réapparus lentement sur les cinq doigts. Après avoir photographié les résultats, T. Robinson a exécuté des moules des empreintes en utilisant deux types de silicone. Il a ensuite retiré la pulpe des doigts (la partie charnue sous la peau) et a replongé chaque doigt séparément dans la solution : le détail des empreintes s'est encore amélioré. De nouvelles photographies retouchées grâce à un logiciel spécialisé ont livré des empreintes si nettes que même les pores sudoripares étaient visibles.

Paradoxalement, la grande qualité des photographies posait problème. Comme l'explique T. Robinson : « Un grand nombre [d'empreintes des fiches] étaient trop encrées, tachées et mal faites. Les empreintes digitales qui venaient d'être obtenues étaient meilleures que celles des fiches, dont la qualité médiocre rendait l'identification impossible. » T. Robinson a pourtant pu exclure dix victimes en déterminant que chacune avait au moins un doigt de la main gauche qui ne présentait pas de boucle, tandis que les cinq doigts de la main trouvée sur le site de la catastrophe



2. UNE EMPREINTE DIGITALE se distingue d'une autre par trois types de caractéristiques. Les détails de type 1 correspondent à la direction générale des crêtes (*ici une boucle orientée vers la droite*), à la position du centre (*en bleu*), à des motifs remarquables, tel le delta (*en rouge*)... Les détails de type 2 (*en vert*), ou minuties, sont des particularités tels des arrêts de crêtes, des bifurcations, des îlots... Enfin, les détails de type 3 (*en violet*) concernent la forme des bords de crête, leur épaisseur, leurs irrégularités...

aérienne en avaient. M. Grimm a éliminé quatre autres victimes sur la base de détails fins des boucles.

Pendant ce temps, avec le généalogiste Chriss Lyon, nous avons recherché des parents vivants des autres victimes, afin de récupérer des échantillons de référence d'ADN mitochondrial. Au mois de septembre 2007, 13 des 30 hommes avaient été éliminés uniquement par leur ADN, neuf sur la base des empreintes digitales seules, et cinq par l'ADN et par les empreintes digitales. Cela laissait trois hommes: le chef de cabine Robert Haslett et les passagers Francis van Zandt et John Elkins.

Les fiches d'empreintes d'Haslett étaient presque inutilisables et aucun parent matrilinéaire vivant n'avait été retrouvé, de sorte que nous ne disposions pas d'ADN mitochondrial de référence pour cet homme. Haslett avait un fils, Randall, mais son ADN mitochondrial ne pouvait donner d'indices sur son père. O. Loreille a alors exploité le chromosome Y, identique chez un père et son fils. Elle a utilisé des techniques avancées pour établir un profil partiel de l'ADN du chromosome Y de la victime inconnue à partir des faibles quantités d'ADN disponibles dans les noyaux des cellules du bras. Ce profil ne correspondait pas à celui de Randall.

Ne restaient plus que deux sujets possibles, van Zandt et Elkins. Les membres de la famille d'Elkins ont refusé de donner leur ADN, et ses fiches d'empreintes digitales étaient trop tachées pour être utilisables. En revanche, les recherches sur van Zandt ont été plus fructueuses.

La longue quête d'une lignée matrilinéaire

Après un premier échec dans la quête d'une lignée matrilinéaire aux États-Unis, nous avons prospecté en Irlande, car la mère de van Zandt était d'origine irlandaise. Grâce à de patientes recherches dans les registres d'état civil et les registres paroissiaux, nous avons retrouvé un de ses cousins éloignés, Maurice Conway, qui lui est lié par une lignée matrilinéaire: son arrière-arrière-grand-mère maternelle était la sœur de la grand-mère de van Zandt! Puisque M. Conway était un parent matrilinéaire, un échantillon de son ADN mitochondrial pouvait servir à l'identification.

O. Loreille a comparé l'ADN mitochondrial du bras sorti des glaces avec tous

les échantillons de référence disponibles pour les hommes du vol 4422. Seul celui du cousin de van Zandt correspondait. Pour bénéficier d'une confirmation supplémentaire, nous avons analysé l'ADN du chromosome Y du fils du frère de van Zandt: il correspondait parfaitement avec celui du bras.

Entre-temps, la recherche d'empreintes digitales de référence avait connu un rebondissement. Les 24 passagers disparus appartenaient à la marine marchande américaine et T. Robinson et M. Grimm avaient découvert que le *National Maritime Center* disposait des empreintes d'un grand nombre de marins, relevées lorsqu'ils s'engageaient à bord d'un bateau. Ces nouvelles fiches ont fourni pour la première fois les empreintes de van Zandt, de sorte que les enquêteurs ont pu constater qu'elles correspondaient à celles de la main découverte.

LES RESTES DE VAN ZANDT sont les plus anciens jamais identifiés grâce à des empreintes digitales.

Ainsi, les restes de van Zandt sont les plus anciens jamais identifiés grâce à des empreintes digitales. En outre, ces analyses s'ajoutent à celles de l'ADN, fournissant des résultats indépendants et concordants.

O. Loreille poursuit désormais ses recherches visant à identifier les corps des soldats inconnus de la guerre de Corée. Elle profite de l'expérience acquise dans l'extraction de l'ADN et des nouvelles techniques de séquençage. Dans un futur proche, celles-ci pourraient autoriser les identifications au moyen de quantités infimes d'ADN, applicables tant à des soldats décédés depuis longtemps qu'à des victimes de catastrophes.

Nos résultats ont aussi mis en évidence l'importance des collaborations interdisciplinaires. Si les experts en analyse d'ADN, en empreintes digitales et en généalogie sont souvent confrontés aux mêmes questions concernant l'identité d'inconnus, ils restent le plus souvent cantonnés à leurs domaines respectifs. Notre enquête sur le vol 4422 de la *Northwest Airlines* a montré que la conjonction d'expertises issues d'horizons divers permet de résoudre les énigmes difficiles. ■

L'AUTEUR



Colleen FITZPATRICK est généalogiste scientifique à Huntington Beach, en Californie.

BIBLIOGRAPHIE

F. Brard et Y. Malignon, L'ADN, auxiliaire de justice, *Dossier Pour la Science* n° 70, janvier-mars 2011.

N. Thiburce, L'empreinte digitale, une preuve infaillible ?, *Dossier Pour la Science* n° 70, janvier-mars 2011.

J.-P. Beauchier, *Traité de médecine légale*, De Boeck, 2011.

O. Loreille et al., Integrated DNA and fingerprint analyses in the identification of 60-Year-Old mummified human remains discovered in an Alaskan glacier, *Journal of Forensic Sciences*, vol. 55, pp. 813-818, mai 2010. www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20384910



Les cellules

Dans les années 1920, un doctorant de l'Université Harvard, Clyde Keeler, élevait des souris aveugles dans sa chambre d'étudiant. Il découvrit que les pupilles de ces animaux se contractaient à la lumière ambiante, mais plus lentement que chez les souris qui voient normalement. D'autres neurobiologistes ont montré que des souris dépourvues de bâtonnets et de cônes (les photorécepteurs de l'œil) réagissent aux variations de luminosité. Chez ces rongeurs, l'horloge circadienne – l'horloge interne qui synchronise l'activité hormonale, la température corporelle et l'alternance de l'éveil et du sommeil – fonctionne correctement. Les animaux vaquaient à leurs activités diurnes durant la journée, et à leurs activités nocturnes la nuit. De façon surprenante, ils en étaient capables malgré l'absence des photorécepteurs nécessaires à la vision chez les vertébrés, mais l'ablation des yeux supprimait cette capacité. Ce phénomène pourrait être courant chez les mammifères dont l'homme : des expériences récentes ont montré que

le rythme circadien est respecté chez certains aveugles, chez qui les pupilles restent capables de se contracter à la lumière. Comment expliquer cet apparent paradoxe ? En admettant que les photorécepteurs de l'œil nécessaires à la vision ne soient pas responsables de la régulation du rythme circadien, d'autres récepteurs auraient cette fonction. Pourtant, bien que la rétine soit l'un des tissus les mieux étudiés, le dogme voulait que les bâtonnets et les cônes soient les seuls photorécepteurs de l'œil.

Toutefois, on sait aujourd'hui que les yeux des mammifères sont pourvus de récepteurs spécialisés dont la formation des images n'est pas la fonction principale. Les molécules qui détectent la lumière dans

LA RÉTINE CONTIENT les cellules photoréceptrices de la vision : les cônes et les bâtonnets. Un troisième type de cellules sensibles à la lumière, les cellules ganglionnaires photosensibles, y sont également localisées : elles contrôlent l'alternance de l'éveil et du sommeil.

oubliées de l'œil

Ignacio Provencio

L'alternance de l'éveil et du sommeil est contrôlée par des cellules sensibles à la lumière situées dans l'œil. Leur étude pourrait conduire à de nouveaux traitements de la dépression saisonnière et autres troubles de l'humeur liés à un manque de lumière.

ces cellules sont différentes de celles présentes dans les cônes et les bâtonnets, et ces cellules sont connectées à d'autres aires cérébrales. En conséquence, de même que les oreilles assurent deux fonctions, l'équilibre et l'audition, les yeux se chargent de la vision, de la régulation du rythme circadien et de la dilatation des pupilles.

Les cellules oubliées de la rétine

Les biologistes connaissent depuis longtemps des animaux ayant des organes sensibles à la lumière, mais qui ne forment pas d'images. Une modification de l'illumination peut signaler à un animal qu'il est exposé à la lumière, et par conséquent à des prédateurs, ou qu'il risque d'éventuelles lésions dues au rayonnement ultraviolet du Soleil. De nombreuses parades ont été sélectionnées au cours de l'évolution, telles que le camouflage, des techniques de fuite et l'adaptation à l'obscurité. Ces stratégies nécessitent un système de

détection de la lumière, mais pas un système visuel au sens propre. Ainsi, en 1911, le zoologue autrichien et futur prix Nobel Karl von Frisch avait remarqué que les vairons, de petits poissons d'eau douce, même aveugles, devenaient plus foncés dès lors qu'ils étaient exposés à la lumière. Des lésions de la base du cerveau abolissaient ce type de réactions ; cela avait conduit von Frisch à proposer l'existence de photorécepteurs non visuels.

Il s'avère que de nombreuses espèces sont dotées de ce type de cellules sensibles à la lumière. Au début des années 1970, Michael Menaker, alors à l'Université du Texas à Austin, avait montré que l'horloge circadienne des moineaux sans yeux fonctionne correctement. Des expériences ultérieures ont établi que les oiseaux ont, dans leur cerveau, des cellules sensibles à la lumière. C'est alors qu'on a découvert qu'une quantité notable de lumière pénètre par les plumes, la peau et le crâne des oiseaux, et active ces cellules.

Les mammifères étaient-ils également dotés de cellules photosensibles non impliquées dans la vision ? C'est ce que les

L'ESSENTIEL

- ✓ Chez certaines personnes qui ne voient pas, l'horloge interne respecte pourtant le rythme circadien.
- ✓ L'horloge interne fonctionne grâce aux cellules ganglionnaires photosensibles de la rétine.
- ✓ Ces cellules sont particulièrement sensibles à la lumière bleue et seraient des vestiges d'organes primitifs.
- ✓ Ces découvertes pourraient aboutir à de nouveaux traitements de la dépression saisonnière et de certains troubles du sommeil.

© SHUTTERSTOCK/ALAIN MICHEL

L'AUTEUR



Ignacio PROVENCIO est maître de conférences en biologie à l'Université de Virginie, à Charlottesville, aux États-Unis.

travaux de Keeler, dans les années 1920, semblaient indiquer, au moins dans le cas de souris aveugles. Comme on connaissait bien l'anatomie de la rétine des mammifères, on supposa que l'énigmatique organe photosensible n'était pas localisé dans l'œil. Au début des années 1980, Randy Nelson et Irving Zucker, de l'Université de Berkeley, ont étudié des rongeurs privés d'yeux et remirent cette hypothèse en question. Chez ces animaux, le rythme circadien ne s'accordait pas avec l'alternance du jour et de la nuit : les récepteurs photosensibles se trouvaient donc bien dans l'œil.

M. Menaker, à l'Université de l'Oregon, étudia le rôle des yeux des souris dans ces réponses photosensibles sans formation d'images. Avec Joseph Takahashi et David Hudson, il examina des souris mutantes, dépourvues de cônes et de

non visuelles à la lumière. Ces résultats ne laissaient qu'une seule interprétation possible : l'œil contient un type de photorécepteurs encore inconnu.

Proposition hérétique ! Les cellules de la rétine impliquées dans la formation des images sont connues depuis les années 1850. Un troisième type de cellules photosensibles présentes dans la rétine n'avait pas pu passer inaperçu !

Et pourtant, au milieu des années 1990, à l'Université des sciences de la santé à Bethesda, nous avons montré, avec Mark Rollag, que R. Foster avait raison. M. Rollag s'intéressait à des photorécepteurs non visuels qui assuraient le camouflage des amphibiens. Des cellules pigmentées présentes dans la queue des têtards devenaient plus foncées à la lumière, une réponse adaptative qui contribuait à camoufler l'animal exposé à la lumière. Ces cellules, nommées mélanophores dermiques, conservaient leur propriété quand elles étaient prélevées et placées en culture. Nous avons identifié, dans ces cellules, une protéine dont la composition est remarquablement similaire à celle des opsines, des pigments qui permettent aux cônes et aux bâtonnets de détecter la lumière. Nous l'avons nommée mélanopsine.

EN PLUS DES CÔNES ET DES BÂTONNETS, les yeux des mammifères possèdent des récepteurs photosensibles non impliqués dans la formation des images.

bâtonnets fonctionnels (avec seulement quelques cônes faiblement actifs). Ils ont constaté que ces souris aveugles s'activent la nuit et se reposent le jour, comme le font les souris normales.

Les quelques cônes qui restaient étaient-ils capables d'assurer une réponse non visuelle à la lumière ? En 1999, l'équipe de Russell Foster, à l'Imperial College de Londres, a utilisé des souris mutantes totalement dépourvues de cônes et de bâtonnets pour montrer que ces cellules ne sont pas indispensables aux réponses

À la découverte des cellules ganglionnaires

Nous pensons que la mélanopsine, si proche des opsines, était la molécule qui modifiait la couleur des amphibiens. Nous avons cherché la mélanopsine dans d'autres cellules photosensibles de la grenouille, prélevées dans le cerveau, l'iris et la rétine de l'œil. Ni les cônes ni les bâtonnets ne contenaient cette nouvelle protéine, qui était cependant présente dans une faible proportion des cellules ganglionnaires, des neurones de la rétine dont on ignorait qu'ils étaient sensibles à la lumière.

La rétine des vertébrés est une structure à trois couches. La plus externe contient les cônes et les bâtonnets, si bien que la lumière doit traverser les deux autres couches avant d'être détectée par ces photorécepteurs (voir l'encadré page ci-contre). L'information codée par les cônes et les bâtonnets est transférée à la couche centrale, où elle est traitée par plusieurs types de cellules. Enfin, ces cellules transmettent le signal traité à la couche la plus

Le dérèglement de l'horloge biologique

Le décalage horaire est la manifestation la plus évidente de la perte de synchronisation entre le cycle jour-nuit et l'horloge interne. Le travail de nuit, qui décale totalement l'horloge interne, augmenterait les risques de maladies cardiovasculaires, de troubles gastro-intestinaux ou de cancer et favoriserait le diabète (de type 2) et les accidents vasculaires cérébraux. Une partie des accidents industriels, comme le

navfrage du pétrolier *Exxon Valdez* en 1989, l'explosion de l'usine *Union Carbide* à Bhopal en Inde en 1984, ou l'accident nucléaire de la centrale de Three Mile Island en 1979, se sont produits la nuit lorsque la vigilance est réduite. Le cas des accidents de la route de nuit est similaire, les conducteurs sont moins attentifs et parfois s'endorment au volant. De surcroît, de nombreuses personnes vivant à des latitudes

extrêmes souffrent d'une dépression saisonnière grave, qui semble notamment due au manque de lumière pendant les courtes journées d'hiver. La découverte du troisième type de photorécepteurs dans la rétine, contrôlant le rythme circadien, et la compréhension de son fonctionnement permettront peut-être de minimiser les effets néfastes du décalage horaire, du travail de nuit et du manque de lumière en hiver.

interne, essentiellement constituée de cellules ganglionnaires. De longs axones prolongent les cellules ganglionnaires formant le nerf optique qui véhicule l'information jusqu'au cerveau.

En 2000, nous avons montré que seules quelques cellules ganglionnaires sont sensibles à la lumière. Nous avons ensuite découvert que deux pour cent des cellules ganglionnaires de la rétine de souris contiennent de la mélanopsine, et que c'est aussi le cas chez l'homme. En 2002, des expériences réalisées par David Berson et ses collègues de l'Université Brown à Providence ont confirmé nos résultats. Ils ont

lésé chez des souris les cônes et les bâtonnets et injecté du colorant qui se fixe sur les cellules ganglionnaires contenant de la mélanopsine. Ensuite, ils ont prélevé les rétines de ces souris et ont montré que les cellules nerveuses colorées réagissaient quand elles étaient exposées à la lumière. Comme les cônes et les bâtonnets n'étaient plus fonctionnels, cette réaction signifiait que ces cellules ganglionnaires, en plus de transmettre les informations issues des cônes et des bâtonnets, étaient capables de détecter elles-mêmes la lumière.

L'hypothèse a été étayée par des données obtenues en 2002 par d'autres équipes.

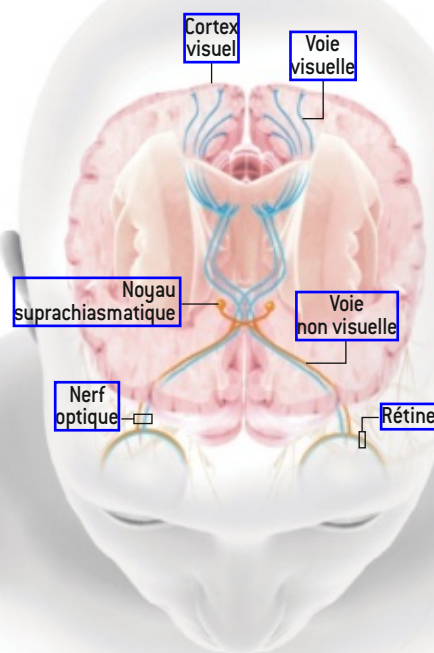
Samer Hattar, de l'Université Johns Hopkins, et ses collègues ont montré que certains axones de la rétine de souris sont connectés au noyau suprachiasmatique – l'aire cérébrale qui régule l'horloge interne – tandis que d'autres interagissent avec les noyaux cérébraux qui contrôlent l'ouverture de la pupille. Et les cellules ganglionnaires reliées à ces aires sont précisément celles qui contiennent la mélanopsine. Toutes ces découvertes confirment que les cellules ganglionnaires photosensibles permettent aux souris dépourvues de cônes et de bâtonnets fonctionnels de rester synchronisées avec

COMMENT DISTINGUER LE JOUR ET LA NUIT ?

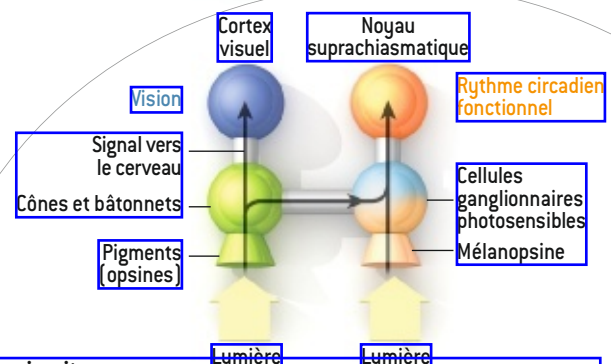
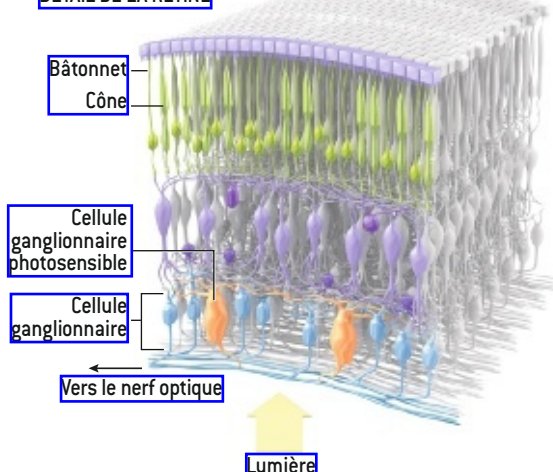
Les rythmes biologiques s'ajustent naturellement sur l'alternance du jour et de la nuit, et une réponse peut persister chez certaines personnes aveugles. Mais jusqu'à récemment, on ignorait comment le cerveau était informé du jour et de la nuit.

Un rôle nouveau pour des cellules familières

Lorsque les cônes et les bâtonnets de la rétine détectent de la lumière, ils envoient des signaux au cortex visuel situé à l'arrière du cerveau. Les cônes et les bâtonnets transmettent ces signaux au cerveau *via* des neurones appelés cellules ganglionnaires de la rétine, dont les prolongements – les axones – constituent le nerf optique (*en bleu, à droite*). Un sous-type, les cellules ganglionnaires photosensibles (*en orange ci-dessous*), produit un pigment, la mélanopsine, qui leur permet de détecter la lumière. Ces cellules envoient l'information sur la lumière du jour à l'horloge biologique centrale située dans le cerveau, le noyau suprachiasmatique (*en orange, à droite*). C'est comme si les yeux contenaient un organe pour voir et un autre pour contrôler les réponses non visuelles de la lumière.



DÉTAIL DE LA RÉTINE



Le circuit
Les cellules ganglionnaires qui contiennent la mélanopsine ne se contentent pas de collecter l'information sur la lumière destinée au noyau suprachiasmatique. Elles transmettent aussi l'information issue des cônes et des bâtonnets vers ce même noyau.

l'alternance du jour et de la nuit. En revanche, des souris dépourvues d'yeux et par conséquent de rétines, seraient totalement désynchronisées.

Il restait un dernier test à faire pour valider cette hypothèse : des souris normales, mais privées du gène codant la mélanopsine, ne devraient présenter aucune réponse non visuelle à la lumière. Mais nous avons alors découvert que l'horloge circadienne des souris sans mélanopsine fonctionnait tout de même !

Existait-il encore un photorécepteur non visuel dans la rétine ? C'était peu probable, car le génome de la souris, qui avait été séquencé à peu près à l'époque où nous avions réalisé nos études, ne contenait pas d'autres gènes codant des photopigments.

Les trois types de récepteurs – cônes, bâtonnets et cellules ganglionnaires – contrôlaient-ils conjointement les réponses non visuelles à la lumière ? Nous avons testé cette hypothèse avec des souris dépourvues de cônes, de bâtonnets et de mélanopsine : elles ne présentaient aucune réponse visuelle ou non visuelle à la lumière et se comportaient comme si elles n'avaient pas d'yeux. Nous avons fini par montrer que les cônes, les bâtonnets et les cellules ganglionnaires contenant de la mélanopsine coopèrent pour transmettre au cerveau l'information lumineuse non visuelle.

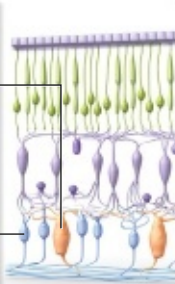
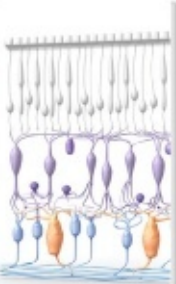
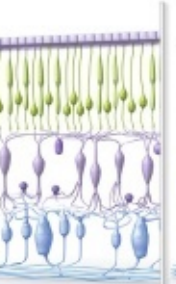
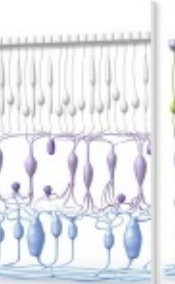
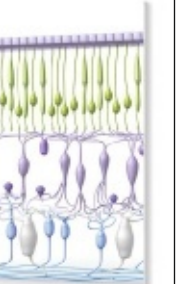
En fait, selon des données récentes, les cellules ganglionnaires photosensibles fonctionnent comme voie de transmission

de l'information lumineuse non visuelle des cônes et des bâtonnets vers le cerveau, tout comme les autres cellules ganglionnaires de la rétine transmettent l'information visuelle vers les aires visuelles du cerveau. En 2008, une méthode a été mise au point pour détruire sélectivement les cellules ganglionnaires photosensibles chez la souris, sans perturber le fonctionnement de l'organisme. Bien que les souris aient conservé leur vision, elles confondaient le jour et la nuit, et leurs pupilles ne se contractaient pas correctement (voir l'encadré ci-dessous). En d'autres termes, les cellules ganglionnaires photosensibles sont nécessaires pour produire des réponses non visuelles à la lumière, mais le système présente une certaine

LA DOUBLE VIE DE L'ŒIL

Pour comprendre comment le rythme circadien des mammifères se cale sur le jour et la nuit, les neurobiologistes ont observé ce qui se passe quand différentes parties de l'œil sont lésées. Ils ont ainsi découvert que les cônes et les bâtonnets ne sont pas essentiels pour cette fonction, mais que quelque chose dans l'œil l'est (deuxième et troisième colonnes). Lorsque la mélanopsine a été détectée dans certaines cellules ganglionnaires rétiniennes sensibles à la lumière, on a cru que ce pigment était la clef de l'énigme ; mais lui non plus n'est pas indispensable.

D'autres expériences (cinquième et sixième colonnes) ont montré que ce sous-ensemble de cellules ganglionnaires doit être présent, mais que le système est redondant. Si les cellules ganglionnaires qui contiennent normalement de la mélanopsine n'en produisent pas, des rythmes normaux persistent tant que les cônes et les bâtonnets fonctionnent. Lorsque les cônes et les bâtonnets ne sont pas fonctionnels, la mélanopsine des cellules ganglionnaires peut fournir les signaux suffisants pour caler l'horloge interne.

						
Cellule ganglionnaire photosensible (fabrique de la mélanopsine)						
Cellule ganglionnaire						
Expérience	Rétine normale	Cônes et bâtonnets non fonctionnels (par génie génétique chez la souris ou mutation génétique chez l'homme)	Pas d'yeux (ablation chirurgicale chez les souris)	Pas de mélanopsine (souris génétiquement modifiées)	Pas de cônes, pas de bâtonnets, pas de mélanopsine (souris génétiquement modifiées)	Pas de cellules fabriquant la mélanopsine (détruites chez la souris)
Vision ?	✓	✗	✗	✓	✗	✓
Rythme circadien ?	✓	✓	✗	✓	✗	✗
Conclusions						
	Fonctionnement normal	Cônes et bâtonnets pas indispensables pour se caler sur la lumière	Les yeux sont nécessaires pour s'ajuster	La mélanopsine n'est pas indispensable	Soit les cônes et les bâtonnets, soit la mélanopsine, sont nécessaires	Les cellules fabriquant la mélanopsine sont indispensables

SENSIBLES À LA LUMIÈRE, MAIS AVEUGLES

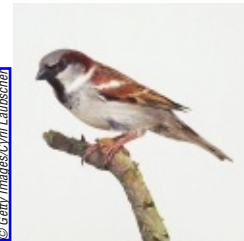
Chez la plupart des organismes, l'horloge biologique se cale sur la lumière du jour. Certains sont dotés d'organes photosensibles qui ne participent pas à la vision. Ces derniers sont aussi utilisés pour d'autres réponses non visuelles à la lumière, telles celles qui avertissent les animaux qu'ils doivent se cacher. Bien que chez l'homme et d'autres mammifères les récepteurs non visuels soient localisés dans l'œil, ce n'est pas toujours le cas.

© Getty Images/Alamy, pour et après l'édition



Les têtards et d'autres amphibiens détectent la lumière à l'aide de cellules pigmentées de leur peau, de sorte qu'ils peuvent adapter leur camouflage à différents contextes.

© Getty Images/Alamy, pour et après l'édition



L'horloge circadienne fonctionne même lorsque les moineaux sont privés de leurs yeux. Des cellules spécialisées dans leur cerveau peuvent détecter la lumière qui traverse les plumes, la peau et le crâne.

© Getty Images



Les souris ont été les premiers mammifères dont il a été montré que leur horloge circadienne fonctionne même lorsqu'elles sont aveugles. Dans ce cas, les récepteurs non visuels de la lumière sont dans les yeux.

redondance. Ces cellules peuvent soit détecter la lumière de façon autonome, soit relayer les informations en provenance des cônes et des bâtonnets, ou les deux.

L'énigme était résolue – au moins pour les souris. Des données récentes suggèrent que les mêmes mécanismes existeraient chez l'homme. R. Foster et ses collègues ont publié en 2007 une étude concernant deux personnes aveugles n'ayant pas de cônes ni de bâtonnets fonctionnels, mais dont le rythme circadien restait correct à condition qu'elles soient périodiquement exposées à de la lumière bleue. La lumière bleue correspond précisément à la gamme des longueurs d'onde activant la mélanopsine.

L'énigme est résolue

Encore plus intéressant, nous avons montré que la mélanopsine déclenche une cascade de réactions biochimiques dans les cellules éclairées qui ressemble plus à ce qui se passe chez la mouche et le calmar que dans les cônes et les bâtonnets des mammifères. En fait, nous avons déjà remarqué que la séquence du gène de la mélanopsine ressemble plus à celles de gènes codant des photopigments d'invertébrés qu'à celles de gènes de vertébrés. Ainsi, chez les mammifères, la mélanop-

sine serait le photopigment d'un système photorécepteur non visuel primitif, encore présent aujourd'hui dans la rétine.

Au-delà de son intérêt scientifique, la découverte de cet « organe » caché aura peut-être des conséquences en clinique, car il suggère des liens entre santé de l'œil et santé mentale. Certaines études avancent qu'une exposition à la lumière bleue augmenterait la vigilance, limiterait le décalage horaire ou le manque de sommeil, et soulagerait la dépression saisonnière. Cette pathologie, plus fréquente sous les latitudes élevées, est due au manque de lumière et de soleil ; elle peut déclencher des dépressions graves, voire conduire au suicide. La luminothérapie est efficace parce qu'elle stimule les cellules ganglionnaires photosensibles.

D'autres études ont montré que les enfants aveugles chez qui les cellules ganglionnaires de la rétine sont endommagées présentent plus de troubles du sommeil que les enfants dont la cécité est due à d'autres causes. L'intégrité et le bon fonctionnement des cellules ganglionnaires photosensibles représentent aujourd'hui un nouvel enjeu pour la médecine. Une classe inédite de traitements visant une large gamme de pathologies résultera peut-être de ces recherches sur des souris aveugles.

BIBLIOGRAPHIE

M. Tri Hoang Do et K.-W. Yau, **Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells**, *Physiological Reviews*, vol. 90, n° 4, pp. 1547-1581, 2010.

P. Bourgin et al., **Au rythme du jour et des saisons**, *Pour la Science*, n° 397, pp. 108-114, novembre 2010.

Le sens du temps, *Cerveau & Psycho*, n° 32, mars-avril 2009.

J. Kraft, **Coup de blues en hiver**, *Cerveau & Psycho*, n° 9, pp. 70-75, mars-mai 2005.

D. M. Berson et al., **Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock**, *Science*, vol. 295, pp. 1070-1073, 2002.

I. Provencio et al., **Melanopsin : an opsin in melanophores, brain and eye**, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 95, n° 1, pp. 340-345, 1998.

La sélection de livres

■ POUR LA SCIENCE

Pour bien commencer l'année 2012, approfondissez vos connaissances scientifiques. Primés pour la plupart et devenus des titres de référence dans leur domaine, les livres présentés vous donneront matière à réfléchir sur le monde, les nanosciences, l'architecture, la physique, l'évolution humaine, etc. Bonne lecture !

Matière et matériaux

De quoi est fait le monde ?

Étienne Guyon (dir.)

Secrets des pneumatiques, textiles antibactériens,

rôle des levures dans la pâte à pain... l'Homme a su façonner la matière pour améliorer son quotidien. Mêlant physique, chimie et biologie, cet ouvrage propose 100 sujets illustrés. Un passionnant voyage au cœur de la matière.

Prix Roberval Grand Public 2011

Editions Belin/Pour la Science 2010
336 pages – 27,50 euros – 978-2-7011-5182-3



Réf. 005182

Nouvelle édition

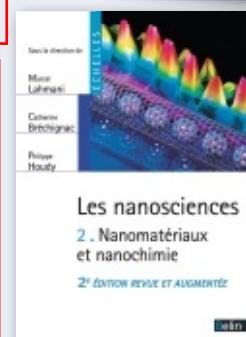
Nanomatériaux et nanochimie

Marcel Lahmani, Catherine Bréchnignac, Philippe Houdy

Ce livre propose un tour d'horizon des nanomatériaux, de leurs propriétés fondamentales et des nouvelles applications que ces matériaux inédits pourraient offrir. L'ouvrage détaille en outre les principales méthodes présidant à l'élaboration des nanomatériaux, ainsi que les procédés de fabrication qui en découlent, sans oublier la nanochimie.

La série des Nanosciences a reçu le Trophée Roberval 2011

Éditions Belin 2012
736 pages – 51,50 euros – ISBN 978-2-7011-6175-4



Réf. 006175

Vient de paraître

Bâtir en terre

Du grain de sable à l'architecture

Laetitia Fontaine et Romain Anger

Entre science et architecture, ce livre explore le patrimoine en terre, de la Shibam au Yémen jusqu'aux Hakkas en Chine. À l'aide d'expériences simples et ludiques, les auteurs présentent aussi les propriétés physico-chimiques de ce «bêton naturel» qu'est la terre.

Prix Le Goût des sciences 2010 • Prix Roberval 2010

Editions Belin 2009
224 pages – 30 euros – ISBN 978-2-7011-5204-2



Réf. 006123

En partenariat
avec les éditeurs

Belin:
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777



Tous ces livres sont
également disponibles
en librairie.

Nouvelle édition

Les mathématiciens

Collectif

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

Éditions Belin/Pour la Science 2010
280 pages – 24,00 euros – ISBN 978-2-8424-5109-7



Réf. 075109

Darwin, dessine-moi les hommes

Claude Combes

« Yin me demanda un jour de lui dire qui avait dessiné les hommes, mais elle voulait aussi savoir qui avait dessiné les dinosaures, les chevaux et... les moutons bien sûr. Alors, j'ai parcouru avec elle l'histoire du vivant, cette histoire que l'on appelle "évolution". »

Prix La Science se livre 2007

Éditions le Pommier 2006
528 pages – 25,00 euros – ISBN 978-2-7465-0300-7



Réf. 090372



Kant et le chimpanzé

Georges Chapouthier

En s'appuyant sur les connaissances les plus actuelles de l'éthologie et de la biologie, l'auteur s'attache à démontrer ce que nous devons à l'animalité et ce qui fait notre être propre. La découverte des « cultures animales » n'amène-t-elle pas à concevoir

Réf. 004698

davantage de continuité entre l'homme et l'animal ?

Prix Achille Urban 2010

Éditions Belin/Pour la Science 2009

128 pages – 17,50 euros – ISBN 978-2-7011-4698-0

La couleur dans tous ses éclats

Bernard Valeur

Comment percevons-nous les couleurs ? Pourquoi la matière émet-elle des lumières colorées ? Qu'est-ce que le jaune de Naples, le bleu outremer ou le vert Milori ? La couleur n'a pas fini de nous étonner. Voilà l'occasion de parcourir ses mystères en 50 sujets, chacun traité en une double page illustrée pour mieux dévoiler les beautés de la couleur.

Prix Le Goût des sciences 2011

Éditions Belin/Pour la Science 2011

128 pages – 22,50 euros – ISBN 978-2-7011-5876-1



Réf. 005876

Des chiens et des humains



Dominique Guillo

Comment expliquer la relation si particulière que les humains entretiennent avec les chiens ?

Des connaissances accumulées en biologie et en sciences humaines, il ressort une image du chien surprenante, qui impose d'abandonner l'idée d'une frontière infranchissable entre l'homme et l'animal. Nous formons avec lui, depuis les origines, une véritable société.

Réf. 005911

Grand Prix Moron de l'Académie française 2009

Éditions Le Pommier 2009

324 pages – 22,00 euros – ISBN 978-2-7465-0372-4

Le guide des champignons

Guillaume Eyssartier, Pierre Roux

Un guide d'identification riche d'environ 3 000 espèces, parmi lesquelles plus de 1 400 sont illustrées par des photographies. Pour chaque fiche descriptive, les auteurs expliquent les principaux caractères des champignons : anatomie, écologie, toxicité, biologie et classification, ainsi que le rôle crucial des champignons dans les divers écosystèmes. La nouvelle référence sur le sujet.

Prix Émile Gallé 2011

Éditions Belin 2011

1120 pages – 35 euros – ISBN 978-2-7011-5428-2



Réf. 005428

Pour commander ces ouvrages www.pourlascience.fr/librairie *

ou en renvoyant le bon de commande ci-dessous.

* Pour commander les titres édités par Le Pommier : www.editions-belin.fr

LA SÉLECTION

POUR LA
SCIENCE
C'EST AUSSI...

Nanotechnologies et nanophysique

Marcel Lahmani,
Claire Dupas,
Philippe Houdy

Éditions Belin 2009
752 pages – 51,50 euros
ISBN 978-2-7011-5347-6
Réf. 005347



Nanotoxicologie et nanoéthique

Marcel Lahmani,
Francelyne Marano,
Philippe Houdy

Éditions Belin 2010
608 pages – 50 euros
ISBN 978-2-7011-5593-7
Réf. 005593



La physique buissonnière

Jean-Michel Courty,
Édouard Kierlik

Éditions Belin/Pour la
Science 2009
160 pages – 22 euros
ISBN 978-2-8424-5105-9
Réf. 075105



BON DE COMMANDE

à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil • Tél. : 0 808 655 255 • e-mail : pourlascience@daudin.fr

☐ Oui, je commande les livres présentés dans la sélection de *Pour la Science*. Je reporte les titres, prix et références à 6 chiffres correspondant aux ouvrages choisis :

Titre	Réf.	Prix
		€
		€
		€
		€
		€
		€
Frais de port (4,90 € France – 12 € étranger)	+	€
Total à régler	=	€

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

C.P. : _____ Ville : _____
Pays : _____ Tél.* : _____
E-mail* : _____
(pour recevoir la newsletter Pour la Science)

Je choisis mon mode de règlement :

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

Numéro _____

Date d'expiration _____
Cryptogramme _____

Signature obligatoire

Belin
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777



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 ☐.

DPL412

HISTOIRE DES SCIENCES

L'affaire Hubble-Lemaître résolue

Dans la traduction en anglais d'un article de l'astronome Georges Lemaître (1894-1966), un paragraphe a disparu, où il donne les prémisses de ce qui deviendra la constante de... Hubble. Omission de plein gré ou imposée ? La question vient de trouver une réponse.

Dominique LAMBERT

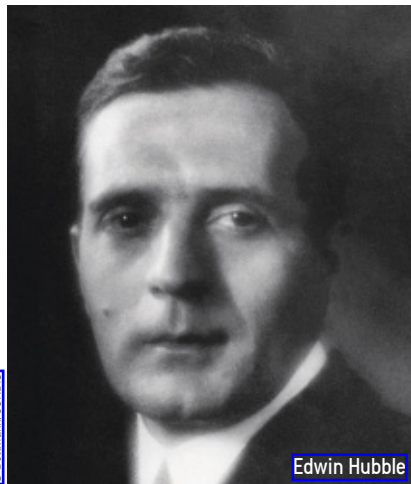
Et si la constante de Hubble, qui fit la gloire de l'astronome américain Edwin Hubble en 1929, avait été découverte deux ans avant lui par Georges Lemaître, jeune prêtre belge mathématicien et astronome chargé de cours à l'Université catholique de Louvain ? Soulevée il y a quelques mois par des astronomes et historiens amateurs, cette question a suscité un vif débat cet automne, que l'astronome Mario Livio, de l'Institut des sciences du télescope spatial, à Baltimore aux États-Unis, vient de clore. Verdict ? Lemaître a bien sa part dans cette découverte, même si, nous allons le voir, l'histoire n'est pas aussi simple.

Un Univers en expansion

Pour le comprendre, revenons en 1927. À cette époque, les astronomes s'interrogent : quelle est la structure de l'Univers ? Comment caractériser sa géométrie à partir des équations d'Einstein de la relativité générale ? Comment rendre compte dans ce contexte du décalage vers le rouge de presque toutes les « nébuleuses » (galaxies) observées à l'époque ? Les scientifiques savent depuis le XIX^e siècle qu'un tel décalage du spectre d'une source lumineuse signifie qu'elle s'éloigne à une certaine vitesse. Les solutions envisagées jusqu'alors sont insatisfaisantes : le cosmos sphérique et statique proposé par Einstein en 1917 est incapable de rendre compte d'un mouvement global de fuite des nébuleuses, et si l'Univers proposé par l'astronome néerlandais Willem de Sitter la même année

peut rendre compte de ce mouvement, il présente une densité de masse nulle, ce que contredisent les observations.

Lemaître est particulièrement intéressé par cette question, car il a étudié en profondeur les propriétés de l'Univers de de Sitter et en connaît les limites. En 1927, dans un article intitulé *Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques*, il dérive, des équations



Edwin Hubble

d'Einstein, une solution intermédiaire entre les Univers d'Einstein et de de Sitter : un Univers sphérique et en expansion. Cet Univers « sans commencement ni fin » tend à l'infini dans le passé vers le cosmos sphérique et statique d'Einstein et, à l'infini dans le futur, vers l'Univers à densité d'énergie-matière nulle de de Sitter.

Lemaître utilise son modèle d'Univers pour expliquer la relation linéaire entre la vitesse v des nébuleuses lointaines et leur distance d par rapport à nous ($v = Hd$), relation qui sera nommée plus tard loi de Hubble. L'explication de Lemaître est la suivante : ce ne sont pas les galaxies qui bougent « dans » l'Univers, c'est l'Univers qui, par son expansion, éloigne les galaxies les unes des autres avec une vitesse proportionnelle à leur éloignement.

Pour déterminer le coefficient de proportionnalité aujourd'hui noté H et nommé « constante de Hubble », Lemaître se fonde sur les vitesses radiales de 43 galaxies mesurées par l'astronome américain Vesto Slipher et publiées par Gustav Strömberg (de l'Observatoire du mont Wilson en Californie) en 1925. Il se fonde aussi sur les mesures de distance effectuées dans l'équipe de Hubble en 1926. Il arrive ainsi à une valeur de H de 575 kilomètres par seconde par mégaparsec (ce qui signifie que les galaxies qui sont éloignées de 1 mégaparsec sont animées d'une vitesse de 575 kilomètres par seconde). Cette valeur, éloignée de celle mesurée aujourd'hui (65 kilomètres par seconde par mégaparsec), est tributaire d'erreurs importantes sur les distances, dont Lemaître est conscient et qu'il analyse dans son article.

Lemaître a eu la chance de se trouver au bon endroit au bon moment ! Aux États-Unis durant les années 1924-1925, il a pratiqué l'astronomie à l'Observatoire du Collège Harvard tout en travaillant, à l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), à une thèse de physique sur la recherche de certaines

solutions des équations d'Einstein. Durant cette période, il a visité les grands observatoires astronomiques américains et même assisté à une conférence de Hubble : « Au printemps 1925, peu avant mon retour [en Belgique], j'ai eu l'occasion d'assister à une réunion de l'Académie à Washington et d'y entendre Hubble présenter la découverte des céphéides dans la nébuleuse d'Andromède, ce qui établissait définitivement la distance de celle-ci, et donc la structure générale de l'Univers. »

L'article de Lemaître est essentiel dans la mesure où il est le premier à donner une explication physique du décalage vers le rouge des galaxies lointaines et à le faire en joignant des données astronomiques à un modèle relativiste d'univers en expansion. Hubble a publié, en 1929, le célèbre article où il décrit la relation de proportionnalité $v = Hd$ à partir des mesures de vitesses de Slipher et de ses propres mesures de distance, plus précises à cette époque que celles utilisées par Lemaître deux ans auparavant (il trouve une valeur de H d'environ 500 kilomètres par seconde par mégaparsec). Mais, il n'y a aucun doute à ce propos, c'est bien Lemaître qui a fourni le premier une explication de la relation $v = Hd$.

Un paragraphe disparaît

L'article de Lemaître ne connut pas immédiatement la gloire qu'il méritait. La raison n'est pas liée au fait qu'il fut publié en français dans ce qui peut paraître une obscure revue. Les *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* éditaient des contributions de haut niveau scientifique et étaient diffusées dans nombre de bibliothèques universitaires et d'observatoires de par le monde ; et le français était lu par un public scientifique beaucoup plus nombreux qu'aujourd'hui. Einstein lui-même avait, grâce à un ami, lu l'article de Lemaître dès sa parution et c'est ce qui lui permit de déclarer au jeune abbé en 1927, lors du Congrès Solvay à Bruxelles, que du point de vue physique, son idée d'expansion de l'Univers lui paraissait « tout à fait abominable », en même temps qu'il lui apprenait que le mathématicien russe Alexandre

1. GEORGES LEMAÎTRE (ici en 1934) avait dès 1927 donné une explication scientifique à la fuite des galaxies à une vitesse proportionnelle à leur éloignement. Néanmoins, pour lui, cela ne fait aucun doute : Edwin Hubble (page ci-contre dans les années 1930) est celui qui, en 1929, établit cette loi, depuis dite de Hubble.



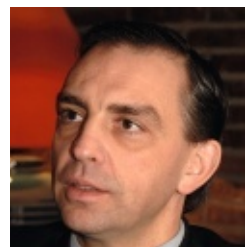
ARCHIVES GÉOMÈS LEMAÎTRE, UCL - COURTESY OF NEDRA BOUTIQUE

Friedmann avait trouvé lui aussi des solutions correspondant à des Univers en expansion. Ce qui a freiné la diffusion de l'article de Lemaître, c'est le fait que bon nombre de physiciens, dont Einstein et Hubble, n'admettaient pas cette idée d'une histoire de l'Univers. Lemaître avait envoyé son article à sir Arthur Eddington, qui avait été à Cambridge son professeur durant l'année 1923-1924. Mais l'astronome ne l'avait pas lu !

En février 1930, Eddington publie une note dans laquelle il demande que l'on étudie des modèles d'Univers intermédiaires entre l'Univers statique d'Einstein et l'Univers vide de de Sitter. C'est justement ce que Lemaître a déjà fait. L'abbé écrit à son ancien professeur : « Cher Professeur Eddington, je viens juste de lire le numéro de février d'*Observatory* et votre suggestion de rechercher des solutions non statiques intermédiaires entre celles d'Einstein et de de Sitter. J'ai mené ces recherches il y a deux ans. Je considère un Univers de courbure spatiale constante, mais qui augmente dans le temps. Et je mets en évidence l'existence

Lemaître
1934

L'AUTEUR



Dominique LAMBERT est professeur de philosophie et d'histoire des sciences aux Facultés Universitaires Notre Dame de la Paix, à Namur (FUNDP), et membre de l'Académie royale de Belgique.

d'une solution où les nébuleuses s'éloignent toujours, d'un temps "moins l'infini" jusqu'à un temps "plus l'infini". »

À partir de ce moment, Eddington fera tout pour mettre en avant la contribution de son élève et il jouera un rôle majeur dans la demande de traduction de son article en anglais. C'est ici que commence l'objet de la récente controverse. Le 17 février 1931, Lemaître reçoit une lettre de William Smart, l'éditeur des *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, lui proposant, au nom du Conseil de la Société royale d'astronomie, dont fait partie Eddington, de publier une traduction anglaise de son article de 1927 et de devenir un *fellow* de cette prestigieuse Société. Dans cette lettre, Smart lui propose aussi d'ajouter s'il le souhaite quelques modifications.

La traduction paraît en mars 1931. Une énigme surgit alors, qui n'a d'ailleurs pas échappé, depuis, à un certain nombre de lecteurs : le paragraphe où Georges Lemaître dérivait le taux d'expansion de l'Univers (H) à partir des données astronomiques et sa note sur les erreurs relatives aux distances des galaxies ont disparu. Pourquoi ? Qui est l'auteur de la traduction ? Animés d'une excellente raison, à savoir souligner le fait que Lemaître avait été le premier à expliquer la loi dite aujourd'hui de Hubble, certains astro-

nomes et historiens des sciences en sont récemment venus à soupçonner, mais sans preuves matérielles, l'existence d'une pression qui aurait été exercée sur Lemaître, ou sur son traducteur, visant à assurer à Hubble la priorité de la dérivation de la loi $v = Hd$.

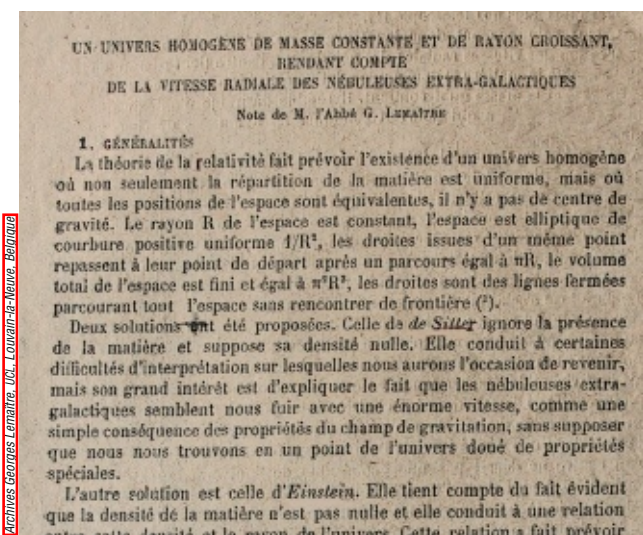
Par souci de modestie

À Louvain, où sont conservées les archives de Lemaître, nul n'a jamais douté que le traducteur était Lemaître lui-même. Ce dernier avait étudié à Cambridge (en Angleterre) et aux États-Unis, et maîtrisait l'anglais. Il eût été surprenant qu'il ne réalisât pas lui-même cette traduction. M. Livio a retrouvé, grâce à la médiation de Peter Hingley, bibliothécaire de la *Royal Astronomical Society*, et de Bob Carswell, l'éditeur en chef des *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, le compte-rendu de la réunion du 13 février 1931 au cours de laquelle fut décidée la traduction de l'article de Lemaître, et la réponse adressée par Lemaître le 9 mars 1931 à la lettre de Smart. Il y apparaît que Lemaître a bien traduit lui-même son article. On y apprend aussi que c'est lui qui a décidé de ne pas reproduire la discussion sur les vitesses radiales de nébuleuses qui mène au calcul du taux d'expansion. Il explique : « Il n'y avait pas lieu, à mon sens, de republier la discussion provisoire sur

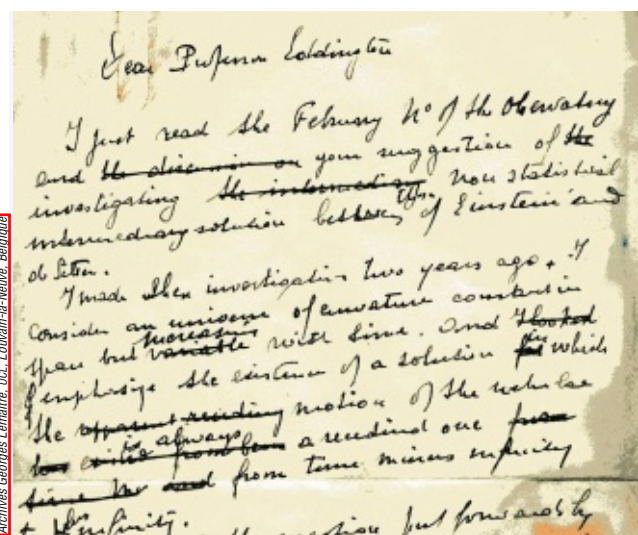
les vitesses radiales, qui n'est plus d'aucune utilité à présent. »

Lemaître était très attentif aux données d'observation. Après son passage à Cambridge et à Harvard, il était devenu un astronome professionnel. En 1931, les données sur les vitesses et les distances des galaxies étaient obsolètes, et des données plus fines avaient été publiées par Hubble dans son article de 1929. On comprend donc que l'abbé n'ait plus souhaité republier des données dépassées. De fait, chaque fois qu'il le pouvait, Lemaître tenait compte des valeurs les plus récentes de H . Dans un manuscrit destiné à une encyclopédie japonaise écrite juste avant la Seconde Guerre mondiale, il adopta « la meilleure valeur [de la constante de Hubble] selon la récente discussion de Knox, Show et Stabley [qui] semble être 405 kilomètres par seconde par mégaparsec ».

En outre, durant toute sa vie, Lemaître n'a jamais cherché à revendiquer une sorte de priorité quant à la découverte de la loi $v = Hd$. Ainsi, dans le compte-rendu du livre de Paul Couderc, *L'expansion de l'Univers* (1950), que Lemaître jugeait par trop élogieux, il déclare : « Avant la découverte et l'étude des amas de nébuleuses, il ne pouvait être question d'établir la loi de Hubble, mais seulement d'en calculer le coefficient. Le titre de [mon article de 1927] ne laisse aucun doute sur mes inten-



2. L'ARTICLE OU, EN 1927, LEMAÎTRE proposa son modèle d'Univers en expansion. Dans la traduction en anglais de cet article, parue en 1931, un paragraphe et une note ont disparu...



3. UN BROUILLON DE LA LETTRE DE LEMAÎTRE À EDDINGTON (1930), dans laquelle il explique à son maître qu'il a déjà proposé, deux ans plus tôt, un Univers intermédiaire entre ceux d'Einstein et de de Sitter.

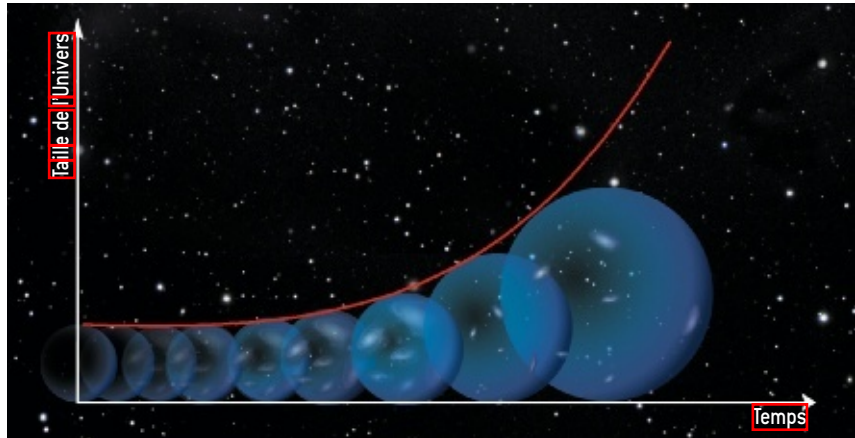
tions. » Et dans ses articles et ses cours après la Seconde Guerre mondiale, Lemaître cite la loi de Hubble sans jamais faire mention de sa propre contribution de 1927.

La controverse résolue par M. Livio a engendré une série d'effets intéressants. Nous en citerons deux. Le premier est d'avoir souligné de manière éclatante le fait que Georges Lemaître est bien le premier à avoir expliqué la « loi de Hubble ». Celle-ci mériterait donc, même si la modestie de Georges Lemaître en eût souffert, que nous la nommions désormais « loi de Hubble-Lemaître ». Et la récente proposition d'attribuer le nom de « Lemaître » à un grand instrument d'astronomie apparaît, dans ce contexte, on ne peut plus judicieuse.

Le Big Bang se dessine

Le deuxième est lié au contenu de la réponse de Lemaître à Smart. Lemaître avait la possibilité de supprimer tous les passages qu'il voulait dans sa traduction. Or, s'il enlève les données d'observations astronomiques effectives (qu'il eût été légitime de conserver malgré l'existence d'autres plus actuelles), il conserve ce qui est de l'ordre de la spéculation hardie : « Même la suggestion finale, qui n'est pas confirmée par un de mes travaux récents, n'a pas été modifiée », écrit-il à Smart. Cette suggestion est la suivante : « Il resterait à se (sic !) rendre compte de la cause de l'expansion de l'Univers. Nous avons vu que la pression de radiation travaille lors de l'expansion. Ceci semble suggérer que cette expansion a été produite par la radiation elle-même. »

Cette idée spéculative (et fausse !) est la trace d'une réflexion qui a pris corps lorsque Lemaître a réfléchi sur une autre idée spéculative (et fausse aussi), publiée en 1928 par Robert Millikan et Harvey Cameron, sur la nature des rayons cosmiques, des rayonnements très énergétiques détectés dans la haute atmosphère. Pour Millikan et Cameron, ces rayons sont produits dans l'espace, lors de la formation de noyaux atomiques à partir de protons et d'électrons, lesquels se seraient matérialisés à partir d'un rayonnement primitif. Dans un article de 1930, Lemaître reprend cette idée : « On pourrait



4. LE MODÈLE D'UNIVERS EN EXPANSION PROPOSÉ PAR LEMAÎTRE EN 1927. Son commencement est repoussé à l'infini vers le passé où il se raccorde au modèle statique d'Einstein, et une force répulsive accélère son expansion de façon exponentielle. En 1931, Lemaître affina son modèle en proposant un Univers où le monde a un commencement en feu d'artifice.

admettre que la lumière a été l'état originel de la matière et que toute la matière condensée en étoiles s'est formée par le processus proposé par Millikan. »

Elle est un des éléments qui le conduiront vers l'hypothèse de l'atome primitif. À l'origine de la théorie du Big Bang, cette hypothèse envisage, au commencement du Monde, un Univers ramassé dans un seul « atome » – un élément indivisible et homogène correspondant à un *quantum* d'énergie. Smart proposait à Lemaître d'ajouter une contribution nouvelle à sa traduction. Ce dernier préféra écrire un autre article où l'expansion sera non plus liée à une hypothétique pression de radiation originelle, mais à l'instabilité créée par la formation de condensations de matière dans un Univers quasi statique.

Loin d'être l'instrument d'une censure, la lettre de Smart m'apparaît comme une invitation faite à Lemaître à diffuser ses dernières idées. La lettre retrouvée par M. Livio montre que les préoccupations de Lemaître avaient changé depuis 1927. La question qui l'occupait en cette année 1931 était moins l'expansion de l'Univers que la cause profonde de son expansion et de son commencement, voire la formation des galaxies dans un Univers en expansion. Une controverse en histoire des sciences est toujours intéressante, car elle bouscule les idées et... les archives pour faire apparaître des vérités, y compris celles auxquelles on ne pensait pas !

✓ À ÉCOUTER

En février 2012, Dominique Lambert reviendra sur la controverse dans l'émission **La marche des sciences**, sur France Culture de 14h à 15h. www.franceculture.com

✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Livio, *Mystery of the missing text solved*, *Nature*, vol. 479, pp. 171-173, 2011.

D. Lambert, *Un atome d'univers. La vie et l'œuvre de Georges Lemaître*, Lessius, 2011.

D. Lambert et J. Reisse, Charles Darwin et Georges Lemaître. Une improbable mais passionnante rencontre, Académie Royale de Belgique, Classe des Sciences, 2008.

D. Lambert, *Lemaître. Le père du Big Bang*, *Les Génies de la Science*, n°30, pp. 26-120, 2007.

D. Lambert, *L'itinéraire spirituel de Georges Lemaître suivi de Univers et Atome* (inédit de G. Lemaître), Lessius, 2007.

J.-P. Luminet, *L'invention du Big Bang*, Seuil, 2004.

LOGIQUE & CALCUL

La conjecture du carré inscrit

Placer sur une courbe fermée quatre points formant les coins d'un carré est presque toujours possible. C'est bien, mais comment se débarrasser du « presque » ?

Jean-Paul DELAHAYE

Là où on s'y attend le moins, des questions mathématiques difficiles surgissent, si difficiles parfois qu'elles restent non résolues. Le cas dont nous allons parler est particulièrement étrange puisque la question est « presque » résolue depuis longtemps. Malheureusement, les mathématiciens n'ont pu enlever le « presque », malgré des progrès récents et un siècle de tentatives diverses par des chercheurs chevronnés.

Voici le problème.

1) Dessinez une boucle avec une craie sur un tableau : cercle, ellipse, ovoïde, polygone régulier, etc.

2) Trouvez quatre points de la courbe qui soient les quatre sommets d'un carré.

Si vous êtes patient et méthodique, vous réussirez quel que soit votre tracé sur le tableau (voir la figure 1).

Le constat sur des cas particuliers est intéressant, mais peut-on démontrer qu'il existe un tel carré pour toute courbe fermée simple (qui revient à son point de départ sans se couper) dessinée sur un plan ?

La réponse n'est pas connue dans le cas général, bien que de nombreux cas particuliers aient été traités, lesquels recouvrent à peu près toutes les courbes fermées simples habituellement envisagées en mathématiques. Le problème a été formulé en 1911 par le mathématicien allemand Otto Toeplitz (1881-1940). Depuis, une multitude d'articles mathématiques lui ont été consacrés. J'en ai compté plus de 30, qui,

tout en faisant avancer la résolution de l'énigme ou en traitant certaines variantes, n'en sont pas venus à bout. L'affirmation que « Toute courbe fermée simple contient les quatre coins d'au moins un carré » reste, aujourd'hui encore, une conjecture.

L'énigme est liée au problème concernant le positionnement d'une table sur un monticule. Considérons un terrain bombé, une petite colline, assez régulier pour qu'on puisse l'assimiler à une surface continue. Chaque ligne de niveau est une courbe fermée simple ou la juxtaposition de plusieurs courbes fermées simples. Si la conjecture est vraie ou si les courbes mises en jeu sont suffisamment régulières pour entrer dans la classe des courbes pour laquelle la conjecture est prouvée (voir plus loin), alors sur chacune d'elles, il existe quatre points formant les sommets d'un carré, où l'on peut placer les pieds d'une table carrée ayant des pieds de même hauteur et supposés très fins et assez longs.

Pique-nique sur une colline

À chaque niveau possible, on pourra ainsi poser une table carrée au moins dans une position stable et parfaitement horizontale. Notons toutefois que, pour un niveau donné, la table sera imposée et il faudra donc la fabriquer exprès pour que l'écartement entre les pieds soit le bon, c'est-à-dire égal au côté du carré inscrit sur la courbe de niveau choisie. Heureusement, si la surface du

monticule est assez régulière, le côté du carré inscrit variera de manière continue en parcourant les lignes de niveau, et on aura donc le résultat plus intéressant en pratique : toute table à base carrée donnée et assez haute, dont les pieds ne sont pas trop écartés, pourra être placée horizontalement et d'une façon stable sur le monticule où l'on souhaite pique-niquer.

Revenons au problème initial d'un carré ayant ses quatre coins sur une courbe. Précisons que nous dirons « inscrit sur la courbe » même si d'autres intersections du carré avec la courbe se produisent et que celui-ci sort donc de la zone intérieure délimitée par la courbe. Pour expliquer la situation et la multitude de résultats démontrés autour de la conjecture de Toeplitz, il faut faire un effort de rigueur et nous formulerons quelques définitions.

Une courbe fermée simple C du plan est l'ensemble des points $C(t)$ du plan quand t varie dans l'intervalle des nombres réels compris entre 0 et 1 tel que $C(t)$ soit une fonction continue qui ne prend pas deux fois la même valeur (la courbe ne se coupe pas) sauf en $t = 0$ et en $t = 1$ (la courbe revient à son point de départ).

La propriété d'être continue fait que la courbe C se dessine sans avoir à lever la craie. Cette condition de continuité ne garantit pas que la courbe C soit totalement lisse. Elle peut avoir des angles et, par exemple, un triangle équilatéral ou un polygone quelconque (non croisé) est une courbe fermée simple. Les points où la courbe fermée

simple n'admet pas de tangente (il y en a trois pour le triangle) peuvent être tous les points de la courbe : tel est le cas des courbes fractales comme le flocon de von Koch qui ne possède de tangente en aucun point. Cette courbe dont la longueur est infinie est une courbe fermée simple (voir la figure 3). Bien sûr, il peut y avoir plusieurs carrés inscrits et, pour chaque entier positif n , on connaît des exemples de courbes possédant exactement n carrés inscrits (nous y reviendrons).

Des cas particuliers démontrés

La conjecture n'a pas été prouvée dans le cas général, mais un grand nombre de cas particuliers ont été traités.

- La conjecture est démontrée si la courbe possède une tangente en tout point et si cette dernière varie continûment quand le point glisse sur la courbe, c'est-à-dire si la courbe est parfaitement lisse comme un cercle ou une ellipse.

- La conjecture est démontrée si la courbe délimite une zone intérieure convexe, c'est-à-dire telle que si A et B sont deux points de la zone intérieure, alors le segment AB est entièrement contenu dans la zone intérieure.

- La conjecture est démontrée si la courbe est dotée d'un centre de symétrie ou d'un axe de symétrie.

L'un des résultats les plus puissants concernant la conjecture a été démontré en 1989 par Walter Stromquist, du *Swarthmore College* aux États-Unis. Il indique que la conjecture est vraie pour toute courbe « localement monotone ». La propriété d'être localement monotone signifie en gros que la courbe ne fait pas de zigzag à toute échelle (voir la figure 2) : elle peut en faire un peu, mais les zigzags ne doivent pas s'accumuler en un point. Ce résultat permet de traiter le cas de tous les polygones et de toutes les courbes fermées obtenues en collant un nombre fini de bouts de droites, d'arcs de cercles, d'ellipses, de sinusoides, etc. Toutes les courbes que vous tracerez à la craie entrent dans le champ du théorème de Stromquist !

1. Carré inscrit et table sur un monticule

La conjecture de Toeplitz est l'affirmation, toujours sans démonstration en 2012, que toute courbe fermée simple (une boucle ne se coupant pas) contient quatre points formant les sommets d'un carré (a), que l'on dénomme « carré inscrit ».

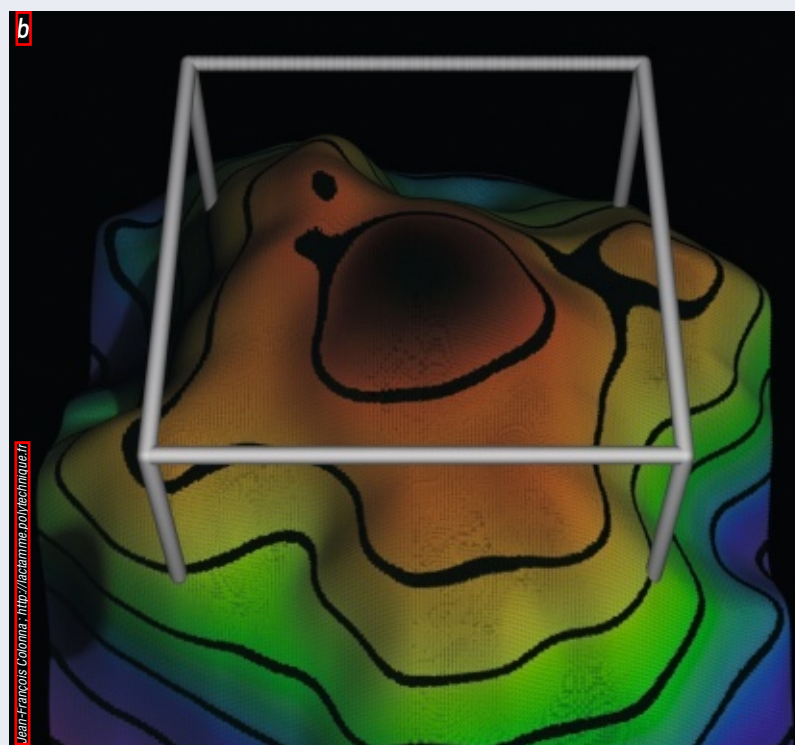
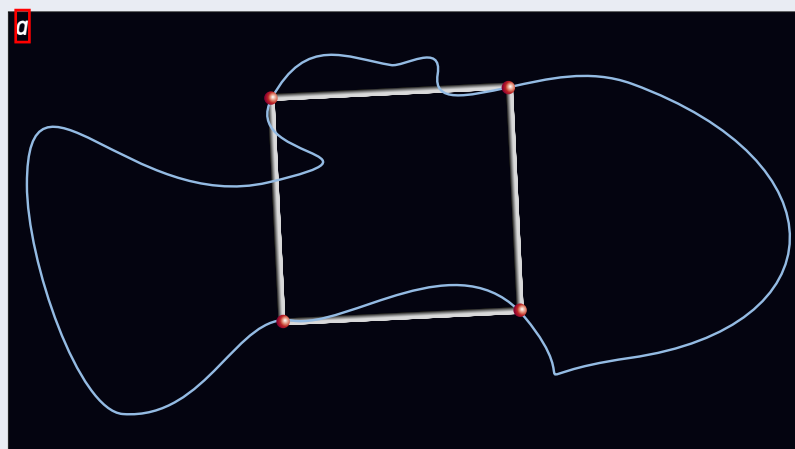
Le problème de la table carrée sur un monticule (b) est

un problème du même type à trois dimensions : peut-on placer horizontalement une table pour qu'elle soit stable, c'est-à-dire telle que les quatre pieds (chacun de même longueur et infiniment fins, formant un carré) touchent la surface ?

Le théorème de la table de Roger Fenn indique les

conditions sur la surface du monticule qui assurent que toute table à base carrée pas trop grande pourra être convenablement posée.

Ce théorème totalement démontré contourne la conjecture de Toeplitz toujours incertaine. Nous voilà rassurés pour notre prochain pique-nique.



Jean-François Colonna - <http://lacanma.polytechnique.fr>

2. La conjecture de Toeplitz est presque démontrée

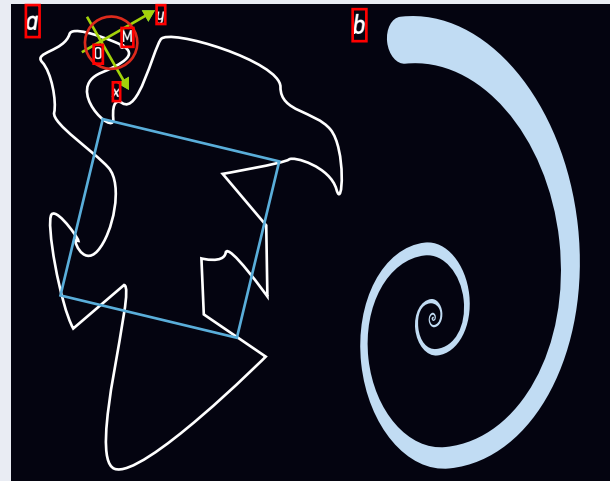
Walter Stromquist a démontré en 1989 que si une courbe fermée simple du plan est *localement monotone*, alors elle possède nécessairement un carré inscrit.

Par définition, pour qu'une courbe soit localement monotone (a), on doit pouvoir associer, à chaque point M de la courbe, un système d'axes Oxy de façon qu'un petit morceau de la courbe autour de M soit tel que deux points de ce bout de courbe ne sont jamais sur une droite parallèle à l'axe Oy.

À l'exception des courbes fractales et de quelques courbes

bizarres, toutes les courbes envisagées en mathématiques sont localement monotones et donc le théorème de Stromquist démontre de manière presque définitive la conjecture de Toeplitz.

Le problème est qu'on ne sait pas se débarrasser du « presque » ! La courbe fermée simple (b) entourant le domaine en bleu est lisse en tous points, sauf au centre où la condition de monotonie locale n'est pas vérifiée. À moins d'un argument particulier, on ne peut lui appliquer le théorème de Stromquist et on n'est donc pas certain qu'elle possède un carré inscrit.



Malheureusement certaines courbes fractales ne sont pas localement monotones, et la conjecture n'est donc pas démontrée pour cette famille de courbes. On obtient une courbe pour laquelle la conjecture n'est pas prouvée en mettant bout à bout des morceaux de la courbe du flocon de von Koch de façon à obtenir une courbe non symétrique.

Le flocon de von Koch lui-même est un exemple intéressant : sa symétrie assure qu'il comporte au moins un carré inscrit. Une étude graphique empirique de Francesco De Comit , au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille, suggère fortement que le flocon comporte une infinité de carrés inscrits, mais pour l'instant le résultat n'est pas établi rigoureusement (voir la figure 3).

Errare humanum est...

Certaines erreurs sont des pièges dans lesquels nous sommes irrésistiblement attirés. Un joli piège est à l'origine de plusieurs résultats faux, heureusement repérés depuis leur publication. Une idée naturelle pour démontrer le cas général consiste à approcher une courbe fermée simple C par une suite $C_0, C_1, C_2, \dots$ de courbes régulières (par exemple des polygones) pour lesquelles on sait qu'il y a un carré inscrit. Partant de cette

suite de carrés (qui n'est pas nécessairement convergente), on sait en extraire une suite convergente de carrés (on ne retient que certains des carrés de la suite). Le fait que les courbes C_i convergent vers C assure que le carré limite de la suite convergente extraite est un carré inscrit dans C .

La conjecture est-elle démontrée ? Hélas non, car, sauf argument supplémentaire, rien n'interdit à la suite extraite de carrés de converger vers un carré... de côté nul.  videmment, cela n'a aucun intérêt, car même si on ne l'a pas précisé dans l'énoncé de la conjecture, il est clair qu'on a exclu le cas des carrés inscrits réduits à un seul point. De nombreuses tentatives de démonstration de la conjecture de Toeplitz et plusieurs démonstrations de cas particuliers exploitent l'idée ici décrite en s'arrangeant pour que le carré limite ne se réduise pas à un point.

La situation aujourd'hui est donc indéterminée, et il n'est pas exclu que les courbes fermées simples du plan qui contiennent les quatre coins d'un carré constituent un sous-ensemble « maigre » de l'ensemble de toutes les courbes fermées simples. La notion de « sous-ensemble maigre » (allez voir la définition de Wikipédia...) exprime l'idée de rareté dans le contexte topologique des ensembles de courbes continues. Elle

a une certaine analogie avec le fait que les nombres rationnels (rapports de deux entiers) sont rares dans l'ensemble des nombres réels. Il est amusant de constater que les cas pour lesquels on a démontré la conjecture recouvrent la grande majorité des courbes que les mathématiciens envisagent, mais que cette partie pourrait malgré tout être infime (« maigre »).

L'apparente contradiction tient à ce que les mathématiciens étudient en priorité les courbes régulières et que celles-ci ne sont pas représentatives des courbes qu'on rencontrerait si on les choisissait au hasard.

La situation est assez analogue à celle des nombres réels calculables, nombres pour lesquels il existe un algorithme qui en énumère indéfiniment les décimales. Les nombres calculables constituent une partie infime des nombres réels (c'est un ensemble qui a autant d'éléments qu'il y a d'entiers, alors qu'il y a plus de nombres réels que d'entiers), ce qui n'empêche pas qu'il a fallu attendre Alan Turing pour réaliser en 1936 qu'il existait des nombres non calculables et en désigner un !

  défaut de faire avancer directement l'énigme récalcitrante de Toeplitz, on tente de comprendre ce qui se passe dans des situations mathématiques proches. Que dire des rectangles, des triangles, des losanges ?

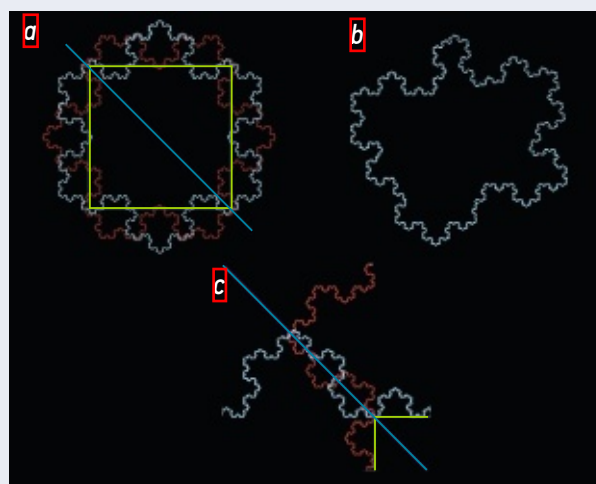
3. Le cas symétrique et la courbe de von Koch

Si une courbe fermée simple du plan possède un centre de symétrie, alors elle possède un carré inscrit : en superposant la courbe à une copie tournée de 90° , on obtient une figure invariante par rotation de 90° . Les points communs à la courbe initiale et à sa version tournée de 90° sont les sommets d'un carré inscrit (a).

Le flocon de von Koch n'est pas localement monotone et le résultat de Stromquist ne s'applique pas. Toutefois, il possède un centre de symétrie et donc un carré inscrit. La figure (b) a été obtenue en recollant des bouts de courbes prises sur

le flocon de von Koch de manière à éviter toute symétrie : on obtient une figure qu'aucun des théorèmes connus ne permet de traiter : cette figure ne possède peut-être aucun carré inscrit.

La figure (c) montre la partie de l'image (a) où le flocon de von Koch rencontre sa version tournée de 90° . Chaque point de rencontre détermine un carré inscrit. On est persuadé qu'il y a un nombre infini de points d'intersection, et donc de carrés inscrits. Ce travail empirique réalisé par Francesco De Comitè n'a pour l'instant pas été confirmé par une démonstration.



Que deviennent ces questions quand on passe du plan à l'espace ? Que deviennent ces questions en géométrie discrète où l'on envisage des courbes composées de pixels en nombre fini (seules courbes que l'informatique considère) ?

Remplacer le carré par un rectangle, un triangle, un losange

Commençons par rendre le problème plus facile en remplaçant le carré recherché par un rectangle. Cette version a été résolue par Herbert Vaughan en 1977 : toute courbe fermée simple du plan contient au moins un rectangle inscrit. Cette propriété est démontrée en quelques lignes.

Et dans l'espace à trois dimensions, une courbe fermée simple contient-elle toujours un rectangle inscrit ? Non, un contre-exemple a montré qu'il existe des courbes de l'espace ne possédant aucun rectangle inscrit (et donc aucun carré inscrit). Un résultat de 1995, positif cette fois, de Mark Nielsen et S. Wright établit que dans l'espace, toute courbe fermée simple symétrique par rapport à un plan ou symétrique par rapport à un point possède un rectangle inscrit.

Et pour les triangles ? La réponse est catégorique : toute courbe fermée simple du plan possède au moins un triangle équilatéral inscrit.

Ce résultat se généralise à un triangle quelconque : si T est un triangle fixé, et que C est une courbe fermée simple du plan, alors C contient au moins les trois sommets d'un triangle semblable à T . En fait, M. Nielsen a indiqué en 1992 qu'il existe une infinité de points de la courbe qui sont sommets d'un triangle semblable à T inscrit dans C et que ces points forment un sous-ensemble dense de la courbe : entre deux points différents de la courbe, aussi proches soient-ils, il existe toujours un point P sommet d'un triangle semblable à T inscrit dans C .

Pour les losanges et donc aussi pour les parallélogrammes, c'est encore bon : toute courbe fermée simple du plan contient au moins un losange inscrit.

Le théorème de M. Nielsen qui établit ce résultat montre de plus que, si une direction est fixée, on peut demander au losange recherché d'avoir deux de ses côtés parallèles à cette direction. V. Makleev, de l'Université de Saint-Petersbourg, a établi en 2004 que le résultat était encore vrai dans l'espace (sans, cette fois, que l'on puisse imposer à certains côtés du losange d'être parallèles à une direction donnée).

L'AUTEUR



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

4. Quatre petits problèmes

• Existe-t-il des courbes fermées simples du plan qui possèdent des carrés inscrits passant par chacun de leurs points ?

Un cercle et un carré ont bien sûr cette propriété. De nombreuses autres courbes fermées possèdent cette propriété (dont toutes les courbes invariantes par une rotation de 90°). Francesco De Comit  a dessiné les figures *a*, *b*, *c*, *d*.

• Trouver une courbe fermée simple du plan n'ayant qu'un seul carré inscrit.

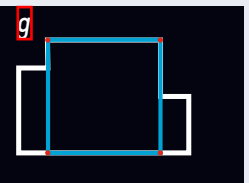
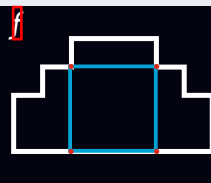
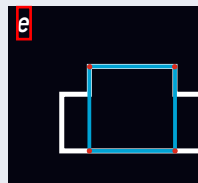
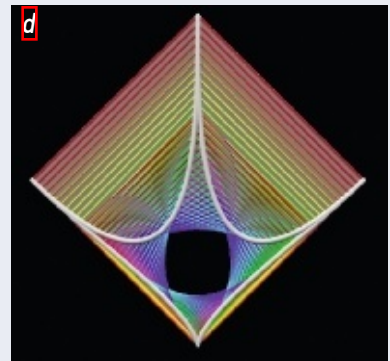
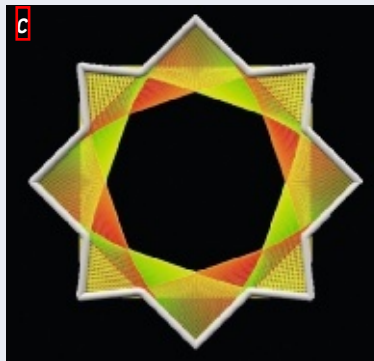
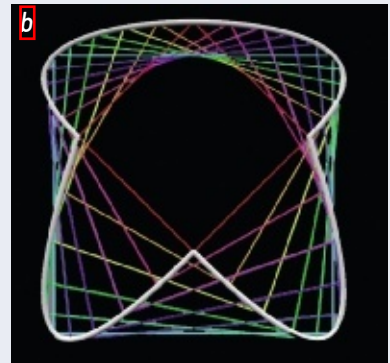
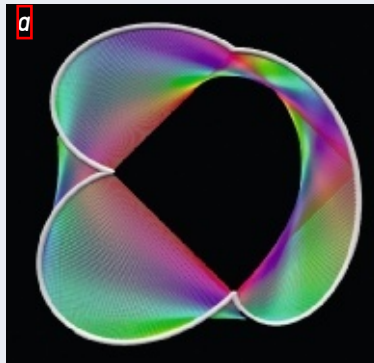
Solution : voir les figures *e*, *f*, *g*.

• Toute courbe fermée simple du plan contient-elle les sommets d'un pentagone régulier inscrit ? [Autrement dit, la conjecture de Toeplitz avec les carrés se généralise-t-elle avec les pentagones ?]

Non. Un triangle équilatéral, à cause des problèmes créés par les angles, ne peut pas contenir les cinq points d'un pentagone régulier. De la même façon, une courbe fermée simple du plan ne contient pas toujours un polygone régulier de plus de cinq côtés.

• Tout point *P* donné d'une courbe fermée simple *C* est-il le sommet d'un triangle équilatéral inscrit dans *C* ?

Non. Soit *C* un triangle isocèle dont l'angle au sommet est inférieur à 120° . Ce sommet *P* ne peut pas être le sommet d'un triangle équilatéral inscrit dans *C*.



5. Les courbes informatiques

Les différents pixels d'une courbe (assimilés à des petits carrés sur un quadrillage) forment une ch  ne de voisins.

Dans le cas des courbes fines, le mot « voisins » signifie « avoir au moins un point en commun ». Pour les courbes épaisses, deux

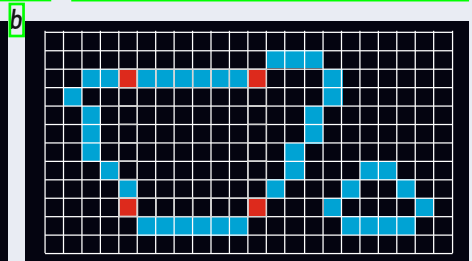
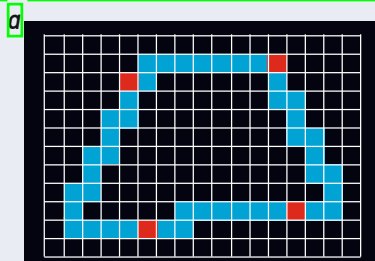
pixels voisins de la courbe doivent avoir au moins un côté en commun.

Pour éviter les recouvrements et imposer le retour au pixel de départ (courbe fermée simple), on ajoute dans les deux cas que chaque pixel possède deux voisins exactement. Le problème du

carré inscrit dans le monde discret des pixels est alors clairement posé... et a été résolu en 2011 :

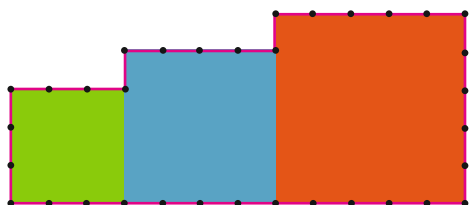
- toute courbe épaisse fermée simple possède au moins un carré inscrit (*a*) ;
- il existe des courbes fines fermées simples qui n'ont pas de carré inscrit (*b*).

Dans une courbe «  paisse », deux pixels voisins ont au moins un côté en commun (*a*). Dans une courbe « fine », deux pixels voisins ont au moins un point en commun (*b*, deux exemples d'une telle courbe). Les propriétés de ces courbes vis-à-vis des carrés inscrits sont différentes.



Un carré est constitué de deux paires de côtés opposés parallèles et ses deux diagonales ont même longueur. Une généralisation du carré dans l'espace est le quadrilatère ayant ses quatre côtés égaux ainsi que ses deux diagonales, que nous nommerons « le quasi-carré ». Jason Cantarella et John McCleary, aux États-Unis, ont démontré que toute courbe fermée simple assez régulière de l'espace à trois dimensions possède un tel quasi-carré inscrit. « Assez régulière » signifie que la courbe est non seulement continue, mais qu'elle a une tangente en chaque point, tangente qui varie continûment quand le point de tangence glisse le long de la courbe.

Les carrés inscrits peuvent-ils être nombreux ? Peut-il par exemple y en avoir cinq, ni plus ni moins ? Là encore, bien que les résultats soient récents, on n'a pas rencontré d'obstacles majeurs. Pour tout entier strictement positif n , il existe une courbe fermée simple du plan qui possède exactement n carrés inscrits. Le résultat a été démontré en 2008 par Strashimir Popvassilev, au *City College* de New York, qui a pu établir qu'on peut imposer de plus à la courbe d'être indéfiniment différentiable (c'est-à-dire parfaitement lisse) et même qu'on peut avoir exactement n carrés inscrits en imposant à la courbe de délimiter une zone intérieure convexe. Le théorème est patent pour les polygones, comme le montre la figure ci-dessous qui résout le cas $n = 3$ et qui se généralise de façon évidente.



Le nombre de carrés inscrits sera fréquemment impair. En effet, si la courbe fermée simple est un polygone n'ayant rien de particulier, deux de ses côtés ne sont jamais parallèles ni orthogonaux, ou si la courbe fermée simple est extrêmement lisse, définie par des fonctions analytiques, alors le nombre de carrés inscrits est infini ou impair.

Par ailleurs, le mathématicien japonais Shizuo Kakutani a démontré en 1942 que

tout volume convexe de l'espace peut être enfermé dans un cube exinscrit dont chaque face touchera le volume. Notons enfin qu'un théorème de l'Anglais Roger Fenn a réglé en 1970 le problème de la table évoqué au début de l'article. Si la fonction continue définissant le monticule est positive sur un ensemble convexe et nulle ailleurs, alors toute table carrée pas trop grande pourra être convenablement posée sur le monticule.

Carrés inscrits sur courbes pixellisées

Les travaux de Feliú Sagols et Raúl Marín, de l'Institut polytechnique national du Mexique, auront peut-être des applications puisqu'ils concernent les figures dessinées avec des pixels et que des algorithmes de calculs des carrés inscrits ont été proposés.

Le plan discret n'est qu'un tableau de cases carrées, les pixels, constituant un grand quadrillage. Deux notions de courbes discrètes sont naturelles : les courbes fines et les courbes épaisses (voir la figure 5). Le problème du carré inscrit se pose dans ce contexte : toute courbe épaisse fermée simple contient les quatre coins d'un carré et il existe des courbes fines fermées simples qui ne contiennent aucun carré inscrit (jamais quatre de leurs pixels ne sont les quatre coins d'un carré).

La démonstration du résultat positif concernant les courbes épaisses n'est pas aussi simple qu'on l'imagine. Cela montre une fois encore que bien des problèmes du continu ont des traductions intéressantes dans le monde du fini des pixels et de l'informatique.

Le monde mathématique est étrange et certains passages semblent interdits. Même dans des domaines élémentaires (comme celui des courbes fermées simples du plan) pour lesquels on s'imaginait bien armé par les outils de l'analyse et de la géométrie, on butte sur des obstacles durs comme le diamant. Rien ne nous permet de reconnaître ces problèmes difficiles avant qu'on ne se cogne à eux et ils semblent surgir au hasard. Ils s'amuse à humilier une communauté vieille de plus de trois millénaires !

BIBLIOGRAPHIE

B. Matschke, *Equivariant topology methods in discrete geometry*, Thèse de l'Univ. de Berlin, 2011.

J. Cottanceau, *La randonnée du carré*, Blog « Choux romanesco, Vache qui rit et intégrales curvilignes », 2011 : <http://eljjdx.canalblog.com/archives/2011/03/20/20671768.html>

I. Pak, *Lectures on Discrete and Polyhedral Geometry*, 2010. <http://www.math.ucla.edu/~pak/geopol8.pdf>

F. Sagols et R. Marín, *Two discrete versions of the Inscribed Square Conjecture and some related problems*, *Theoretical Computer Science*, vol. 412, pp. 1301-1312, 2011.

M. Nielsen, *Rhombi inscribed in simple closed curves*, *Geometriae Dedicata*, vol. 54, pp. 245-254, 1995.

M. Nielsen, *Triangles inscribed in simple closed curves*, *Geometriae Dedicata*, vol. 43, pp. 291-297, 1992.

V. Klee et S. Wagon, *Old and New Unsolved Problems in Plane Geometry and Number Theory*, Mathematical Association of America, 1991.

W. Stromquist, *Inscribed squares and square-like quadrilaterals in closed curves*, *Mathematika*, vol. 36, pp. 187-197, 1989.

R. Fenn, *The table theorem*, *Bull. London Math. Soc.*, vol. 2, pp. 73-76, 1970.

O. Toeplitz, *Ueber einige Aufgaben der Analysis situs*, *Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft in Solothurn*, vol. 4, p. 197, 1911.

ART & SCIENCE

Vermeer, la carte et le castor

Dans L'Officier et la jeune fille riante, un homme porte un chapeau en feutre de castor, matériau précieux dont la confection a participé à la disparition des espèces européennes. À l'arrière-plan, une carte intrigue...

Loïc MANGIN

Pays-Bas, vers 1658. Les Provinces-Unies (l'ancien nom des Pays-Bas) ont déclaré leur indépendance vis-à-vis du trône d'Espagne depuis près de 80 ans, et elle est quasi effective en 1609. Les combats cessent définitivement en 1648 et les militaires, de retour à la vie civile, ont tout loisir de conter fleurette. En 1658 donc, c'est un tel épisode que peint Johannes Vermeer (1632-1675) dans *L'Officier et la jeune fille riante* (voir page ci-contre), une toile conservée à New York.

De dos, un militaire vêtu d'un uniforme rouge éclatant et d'un grand chapeau noir, sur lequel nous reviendrons, disserte avec la jeune fille qui le reçoit et dont il espère sans doute les faveurs. Précisons que l'habitude de se découvrir en présence d'une demoiselle n'était pas encore adoptée. Sur le mur, au fond, une carte étonne.

Elle est intitulée *La Topographie nouvelle et très exacte de toute la Hollande et de la Frise occidentale*. Elle représente la partie occidentale, donnant sur la mer, des nouvelles Provinces-Unies (la Hollande et la Frise en sont deux), l'Ouest étant au sommet de la carte. Cette orientation reflétait les préoccupations majeures de l'époque : les Provinces-Unies sont « tournées » vers la mer du Nord, le large, ce qui est naturel pour un peuple de marins qui a conquis le monde. On retrouve cette carte dans d'autres œuvres de Vermeer, telle *La Femme en bleu lisant une lettre*.

On constate également que les terres sont en bleu et les mers en marron. Pourquoi Vermeer a-t-il interverti les couleurs ? On l'ignore, mais Timothy Brook, historien à l'Université

d'Oxford, s'interroge : le peintre fait-il allusion au changement de prestige des militaires dû au retour de la paix ?

Venons-en au chapeau. À cette époque, au milieu du XVII^e siècle, tous les Hollandais en portaient, du simple bonnet mou, nommé *klapmuts*, au plus prestigieux couvre-chef tel celui porté par l'officier. L'objet était en feutre, une étoffe constituée de poils agglomérés d'animaux, ici du castor. Le feutre de castor était le matériau à la mode et tout individu de haut statut social se devait d'avoir un chapeau fabriqué en cette matière.

**La folie des chapeliers
aurait résulté
des vapeurs toxiques
de mercure.**

La matière première nécessaire à la fabrication de ce feutre n'est pas la fourrure entière de l'animal, mais le sous-poil (des poils courts et denses distincts des poils longs). En effet, au microscope, on observe des écailles (des arpillons) qui se chevauchent sur toute la surface de ces fibres. Ces aspérités favorisent l'agglomération et donc le feutrage. De fait, le feutre de castor est résistant, flexible et il garde sa forme même mouillé.

Les chapeliers faisaient mijoter ce sous-poil dans un mélange d'acétate de cuivre, de gomme arabique et de mercure afin d'obtenir, après foulage et séchage, un feutre d'excellente qualité dédié à la fabrication des meilleurs chapeaux. Notons que la folie souvent

attribuée aux chapeliers résultait probablement des vapeurs toxiques de la mixture.

Jusqu'au XV^e siècle, on utilisait des castors d'Europe occidentale, mais l'animal fut victime de son succès et de la disparition de son habitat naturel. On se tourna alors vers les castors scandinaves, mais les mêmes causes eurent les mêmes effets, et ce fut la fin des chapeaux en castor.

Au XVI^e siècle, les chapeliers n'eurent plus à leur disposition que le feutre de laine, un matériau plus grossier. On ajoutait parfois des poils de lapin, pour faciliter l'agglomération, mais le feutre obtenu était fragile. Enfin, le feutre de laine absorbe l'eau et se déforme dès qu'il est mouillé, à l'inverse du feutre de castor. Le *klapmuts* des Hollandais de basse condition était en feutre de laine.

La situation changea à la fin du XVI^e siècle quand se développa le commerce avec les Amérindiens. Le Français Samuel de Champlain (1567-1635) fut l'un des précurseurs de ce marché. Dans les années 1580, quand les premières peaux arrivèrent en Europe, la demande explosa et ce fut le renouveau des chapeaux en castor. Ces articles se vendaient à prix d'or, à un point tel que l'on vit s'épanouir un marché du « castor d'occasion ». Ces pratiques furent néanmoins vite contrôlées par les autorités qui redoutaient les maladies dues aux poux.

Vermeer, qui jouissait d'un poste prestigieux dans la cité de Delft, avait sans doute lui aussi un chapeau en feutre de castor. Peut-être même est-ce celui qui est peint !

T. Brook, *Le chapeau de Vermeer*. Le XVII^e siècle à l'aube de la mondialisation, Payot, 2010.



© Corbis

IDÉES DE PHYSIQUE

Lire un disque avec des toupies électroniques

En jouant avec les propriétés magnétiques des électrons, on a pu multiplier par presque 1 000 la capacité des disques durs.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

La capacité d'un disque dur de micro-ordinateur (et de certains baladeurs) atteint aujourd'hui facilement le téraoctet, soit 1 000 gigaoctets. En 15 ans, elle a augmenté d'un facteur presque égal à 1 000 ! Cette croissance spectaculaire repose sur des ruptures technologiques. Ainsi, le procédé de lecture des disques modernes utilise un principe physique bien différent de celui des bandes magnétiques et des premiers disques durs. Il s'agit de l'effet dit de magnétorésistance géante, dont la découverte a valu en 2007 le prix Nobel de physique au Français Albert Fert et à l'Allemand Peter Grünberg. Ce phénomène entre dans le cadre de la spintronique, nouvelle forme d'électronique où les propriétés magnétiques de l'électron – son « spin » – sont mises à profit.

Exploiter le spin de l'électron

Qu'est-ce qu'une magnétorésistance ? Lorsque nous imaginons un électron, nous pensons d'emblée à une particule chargée dont la manipulation est à la base de l'électricité et de l'électronique. Sous l'action d'un champ électrique, les électrons libres des matériaux conducteurs se déplacent, ce qui forme un courant électrique. Cependant, au cours de leur mouvement, les électrons subissent des collisions avec les impuretés, les défauts du matériau ou les atomes en vibration. Leurs trajectoires s'apparentent alors plus à une succession de zigzags qu'à un long fleuve tranquille, propriété qui, à notre échelle, se traduit par la résistance électrique.

Quel est l'effet d'un champ magnétique ? Si l'on s'en tient à l'électron comme simple

particule chargée, on prévoit que les électrons vont tourner en hélice autour de l'axe du champ magnétique et, par conséquent, subir plus ou moins de collisions selon les orientations du champ et du courant : il en résultera une variation de la résistance électrique en fonction du champ magnétique. Mais cet effet de magnétorésistance, observé dès 1856 par lord Kelvin, n'a qu'une amplitude de quelques pour cent.

L'histoire ne s'arrête pas là. On sait depuis les années 1920 que l'électron se comporte

aussi comme un tout petit aimant, susceptible de s'orienter. Il a une sorte de rotation propre, mesurée par un « spin » et à laquelle est associé un moment magnétique, proportionnel au spin. Le spin de l'électron n'a que deux valeurs possibles et quand on le mesure selon un axe (quel qu'il soit), il pointe soit dans un sens (vers le « haut », $\uparrow$), soit dans le sens opposé (vers le « bas », $\downarrow$).

Les collisions subies par les électrons perturbent peu leurs spins. La distance entre deux collisions successives



1. DANS UN SANDWICH où les deux couches magnétiques ont des aimantations (flèches blanches) dirigées dans le même sens (a), les électrons (en bleu foncé) dont le moment magnétique est orienté comme l'aimantation subissent peu de collisions : la résistance électrique correspondante est faible. En revanche, pour les électrons (en rouge) de moment magnétique opposé à l'aimantation, les collisions sont nombreuses et la résistance correspondante élevée. Mais la résistance électrique globale est faible (la facilité avec laquelle le cycliste roule sur les deux pistes en est une métaphore). Lorsque les deux couches magnétiques ont des aimantations opposées (b), tous les électrons, quelle que soit l'orientation de leur moment magnétique, finissent par pénétrer dans une couche où l'aimantation est de sens opposé à leur moment magnétique et où ils subissent de nombreuses collisions. Il s'ensuit une résistance électrique globale élevée : aucune des deux classes d'électrons ne circule aisément dans la structure en couches.

étant de quelques nanomètres, le spin reste inchangé – mais seulement à cette échelle de longueur. C'est pourquoi il ne peut être exploité qu'avec des dispositifs de taille nanométrique, ce qui n'est plus un obstacle avec le développement récent des nanotechnologies.

Pour avoir affaire à des électrons ayant des spins alignés, il suffit d'utiliser des matériaux magnétiques conducteurs. Dans la plupart des matériaux, les électrons sont orientés aléatoirement et l'on trouvera autant d'électrons $\uparrow$ que $\downarrow$. En revanche, dans les matériaux magnétiques, une fraction notable des spins électroniques pointent dans la même direction et il en résulte une aimantation macroscopique. Par ailleurs, dans les matériaux magnétiques conducteurs usuels, tels le fer, le cobalt, le nickel et leurs alliages, les électrons intervenant dans le magnétisme sont les mêmes que ceux en jeu dans la conduction électrique. Le courant électrique s'accompagne donc d'un « courant de spin », ou plutôt de deux courants, correspondant aux deux orientations du spin des électrons.

Lire des bits avec un sandwich magnétique

L'émergence de la spintronique, qui exploite les courants de spin, est entièrement liée à la propriété d'origine quantique suivante : lorsqu'il y a dissymétrie entre les populations de spins $\uparrow$ et $\downarrow$, la fréquence des collisions de l'électron dépend de l'orientation de son spin. Pourquoi ?

Lors d'une collision, l'électron change de vitesse, d'énergie, etc. Comme l'impose le principe d'exclusion de Pauli, deux électrons ne peuvent pas se trouver dans un même état. Par conséquent, toute collision qui amènerait un électron dans un état déjà occupé par un autre électron est interdite. Or, dans un conducteur magnétique contenant par exemple plus d'électrons $\uparrow$ que $\downarrow$, il est beaucoup plus difficile pour un spin $\uparrow$ de trouver une place libre parmi les états non occupés par ses semblables que pour un spin $\downarrow$. Par conséquent, les électrons dont le moment magnétique est orienté dans le sens de l'aimantation macroscopique subis-

sent moins de collisions que ceux d'orientation opposée (jusqu'à 20 fois moins par exemple dans le nickel).

Ainsi, la résistance électrique n'est pas la même pour le courant des électrons $\uparrow$ et le courant des électrons $\downarrow$. Voyons comment cette propriété conduit à l'effet de magnétorésistance géante. Ce dernier fait appel à un sandwich de deux couches magnétiques (du fer) encadrant une couche non magnétique (du chrome), l'épaisseur des couches étant de quelques nanomètres.

Imaginons d'abord que les deux couches magnétiques soient aimantées dans le même sens, disons $\uparrow$ (voir la figure 1). Le courant $\uparrow$ qui parcourt le sandwich rencontre dans chacune des trois zones une faible résistance, qui court-circuite la forte résistance subie par le courant $\downarrow$: on mesure aux bornes du dispositif une résistance peu élevée.

Que se passe-t-il si les couches magnétiques sont aimantées dans des sens opposés ? Le courant $\uparrow$ rencontre une faible résistance dans la première couche magnétique, mais une forte résistance dans la seconde. C'est l'inverse pour le courant $\downarrow$. *In fine*, les deux courants subissent en circulant dans le sandwich une résistance élevée.

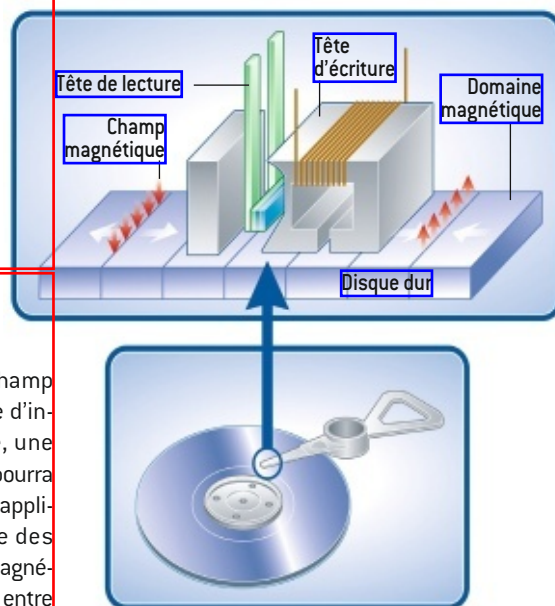
Ainsi, en jouant sur l'orientation relative des aimantations des deux couches magnétiques, on modifie la résistance du dispositif. Un champ magnétique extérieur étant capable d'inverser l'aimantation d'une couche, une mesure de la résistance du sandwich pourra renseigner sur le champ magnétique appliqué. C'est le principe de la lecture des disques durs modernes, où le champ magnétique est celui qui émerge à la frontière entre deux domaines du disque d'aimantations opposées (voir la figure 2).

Pour obtenir une haute sensibilité au champ, il faudrait multiplier le nombre de couches en sandwich si le courant est perpendiculaire. Mais un courant parallèle aux couches est une configuration plus favorable. Elles sont en effet assez minces pour que, lorsqu'un électron circule d'une borne à l'autre, il explore toutes les couches au gré de ses collisions : on a donc bien une

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



2. DANS LES SYSTÈMES à disques durs d'aujourd'hui, la tête de lecture comporte un sandwich de couches magnétiques (en bleu). L'aimantation de l'une des couches est fixée, tandis que celle de l'autre couche est déterminée par le champ magnétique à la surface du disque. Ce champ magnétique est présent à la frontière entre deux domaines magnétiques d'aimantations opposées, et a deux sens possibles. La résistance électrique de la tête de lecture dépend donc du champ magnétique rencontré sur le disque, champ qui lui-même code l'information.

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Chappert, A. Fert et F. Nguyen Van Dau, *The emergence of spin electronics in data storage*, *Nature Materials*, vol. 6, pp. 813-823, novembre 2007.

J.-P. Nozières, *Électronique de spin-spintronique*, *Encyclopaedia Universalis*.

D. Awschalom et al., *La spintronique*, *Pour la Science*, n° 299, septembre 2002.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

différence de résistance selon le sens de l'aimantation des couches, qui exploite la longueur du dispositif plutôt que l'épaisseur des couches. Cette différence peut atteindre plusieurs dizaines de pour cent, soit un à deux ordres de grandeur de plus que pour la magnétorésistance classique.

C'est cette configuration d'un courant parallèle aux couches qu'utilisent les têtes de lecture des disques durs, avec une sensibilité bien meilleure que les anciens dispositifs (qui mesuraient le courant induit dans une petite bobine passant au-dessus des domaines magnétiques du disque).

Pour augmenter la densité d'informations, il a fallu réduire l'épaisseur de la couche d'enregistrement : avec une couche mince, il suffit d'un faible champ magnétique pour aimanter en écriture. Mais il faut être sensible à un champ magnétique très faible pour

la lecture, ce que peut réaliser le sandwich. L'une de ses deux couches magnétiques, plus épaisse, a son aimantation fixe ; l'aimantation de l'autre couche, plus mince, s'aligne avec le champ magnétique issu de la surface du disque. Ainsi, selon ce champ, les couches de la tête de lecture sont aimantées soit dans le même sens, soit en sens inverses : la résistance dans la tête varie et cette variation restitue l'information enregistrée.

La piste est si prometteuse que plusieurs équipes travaillent aujourd'hui sur l'extension de ce dispositif en intercalant un matériau semi-conducteur entre deux couches magnétiques : l'augmentation de la résistance est encore plus marquée. L'effet permet aussi d'envisager le développement de mémoires vives magnétiques... mais ces dernières n'ont pas encore dépassé le stade de prototypes.

france culture

VOYAGER DANS LE TEMPS

La marche des sciences
Aurélie Luneau
14h/15h - jeudi
En partenariat avec *Pour la science*

franceculture.fr

© 2002. Photo : Marc Bourgeat. © Philippe Berrueto. Courtesy gallery Nostal - ADSP. Paris 2011.

SCIENCE & GASTRONOMIE

Des succulences à foison

Inventons des mets délicieux en utilisant la notion de dimension.

Hervé THIS



Les élèves qui apprennent les sciences se plaignent souvent de l'abstraction des mathématiques... parce que l'on n'a pas expliqué que les mathématiciens veulent « faciliter les opérations de l'esprit ». Pour les mêmes raisons, Antoine Laurent de Lavoisier a introduit le formalisme de la chimie, en 1791.

Ici, nous chercherons à imaginer des architectures de plats en utilisant un formalisme qui considère la dimension des objets : 0 pour un point, 1 pour un « fil », 2 pour une feuille ou une membrane, 3 pour un pavé. Par exemple, un spaghetti est de dimension 1, parce que deux de ses dimensions sont au moins un ordre de grandeur plus petites que la longueur du spaghetti.

Ce formalisme aidera à envisager des constructions auxquelles nous n'aurions pas pensé autrement. Cette aide abstraite est particulièrement utile dans la cuisine « note à note » qui consiste à ne plus utiliser viandes, poissons, fruits et légumes, mais plutôt à construire les plats à partir de composés.

Le cuisinier a l'embarras du choix : face à de l'eau, de l'éthanol, des acides aminés, des saccharides, des composés odorants, etc., que produire ? Un premier choix à faire est celui de la forme de l'aliment. Un cube ? Une sphère ? Une pyramide ? La forme

n'est plus donnée par celle des animaux et des végétaux, il faut l'imaginer.

Cela étant, les mets un peu élaborés sont le plus souvent composés non pas d'un objet, mais de plusieurs. D'où la proposition d'utiliser le formalisme évoqué plus haut, qui utilise les notations D_0, D_1, D_2, D_3 pour désigner respectivement les objets de dimension 0, 1, 2, 3. Pour combiner ces objets, on utilise les opérateurs / pour décrire une « dispersion aléatoire », @ pour une inclusion, Σ pour une juxtaposition (on peut spécifier en x, y, z , pour les trois directions de l'espace) et $\times$ pour une imbrication de deux objets distincts (on pourrait, au besoin, ajouter d'autres opérateurs).

On peut ainsi produire des formules en nombre infini, mais je propose ici d'envisager seulement des arrangements de deux objets. Ce n'est pas difficile, il suffit d'écrire d'abord des tableaux tels que celui ci-dessous, où l'objet indiqué dans la première colonne est dispersé dans l'objet indiqué en ligne.

On comprend que l'on peut faire de même pour les autres opérateurs... et que l'on aboutit à des arrangements soit déjà obtenus par la cuisine classique, soit inédits. Le choix du système fait, il restera à choisir la forme exacte (avec ce formalisme, on ne distingue pas un cube d'une sphère), la couleur, l'odeur, la saveur, la consistance, la température...

Un exemple ? En ces temps hivernaux, je vous propose de ne plus entasser les lanières de chou de la choucroute, mais, au contraire, de les tresser $[(D_1 \times D_1 \times D_1) / D_3]$, car l'effet en bouche est remarquable. Ou encore $(D_0 @ D_3)$, de faire prendre en gelée un liquide (pensons à une bonne sauce meurette, avec vin réduit) autour d'une « colonne vertébrale » (des lardons réduits pour rester dans la note bourguignonne). Ou encore $[(D_0 @ D_1) / D_3]$, plus difficile, d'emplir l'assiette avec des cordons obtenus à partir de lardons réunis par une bonne sauce meurette gélifiée. Plus difficile à faire (mais guère), une feuille farcie, avec un cœur coulant $(D_2 @ D_2)$, que l'on réalise en faisant frire une lamelle de foie gras cru trempée alternativement deux fois dans de l'œuf battu et de la chapelure, avant dépôt dans l'huile bouillante.

Avec notre système, aucun système gourmand n'échappe !



Hervé This est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr

	D_0	D_1	D_2	D_3
D_0	De tout petits objets dispersés dans un petit objet, comme une boulette d'œufs de saumon	Comme un collier de perles, avec des petits objets alignés en cordon	Une feuille faite de petits objets, par exemple une mantille de petits pois dans une couche d'omelette	Une masse de petits objets ; si chaque petit objet a un cœur liquide, on obtient l'analogue d'un tissu végétal, ou « conglomère »
D_1	Impossible	Un petit faisceau de fibres ; un fagot de spaghettis, par exemple	Une nappe de fils, un tissu ; on pourrait faire prendre dans une gelée de vinaigrette une julienne de carottes	Les fibres D_1 sont alignées ou désordonnées ; dans le second cas, on obtient un homologue d'une viande, qui a été nommé « fibré »
D_2	Impossible	Impossible	Feuilles superposées, comme des carpaccios de viande, de poisson, de légumes	Une chiffonnade gélifiée, par exemple
D_3	Impossible	Impossible	Impossible	De gros blocs solidarisés, un damier tridimensionnel

→ MATHÉMATIQUES

Correspondance entre Henri Cartan et André Weil (1928-1991)

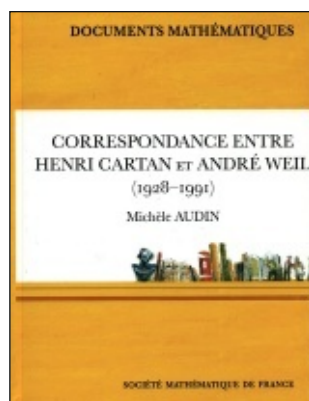
Michèle Audin

SMF, 2011

[725 pages, 60 euros].

En lisant une correspondance épistolaire, on peut avoir l'impression d'entrer par effraction dans la vie de ses auteurs, surtout lorsque ceux-ci sont deux grands mathématiciens qui ont marqué l'histoire récente des mathématiques. Mais la présente correspondance constitue aussi une part concrète et vivante de cette histoire des mathématiques. Henri Cartan et André Weil sont les pères et les fils de Bourbaki, un mathématicien fictif, multicéphale, créé dans les années 1930 par de jeunes normaliens qui voulaient modifier en profondeur les fondements des mathématiques, en rupture avec les générations des XVIII^e et XIX^e siècles.

La correspondance traverse cinq époques : *Premières lettres 1925-1933*, *La guerre 1938-1945*, *Strasbourg-São Paulo 1945-1947*, *Paris-Chicago 1947-1958*, *Après 1958*. Suivent de nombreuses notes de la mathématicienne Michèle Audin, une bibliographie, un résumé des sujets abordés et un index bien documenté.



On s'aperçoit vite que l'amitié entre les deux hommes, née lorsqu'ils étaient élèves de l'École normale supérieure, à Paris, est une constante de cette correspondance, et qu'ils partagent souvent les mêmes inimitiés. Dans un style abrupt, Weil donne des jugements parfois d'une dureté inattendue ; Cartan, même si ses jugements sont percutants, garde quant à lui toujours une grande urbanité.

Si le début de la correspondance aborde principalement des questions mathématiques, la suite traite surtout de postes et des inévitables intrigues qui se déroulent au moment des négociations cruciales. On y retrouve tous les noms des mathématiciens qui ont marqué le XX^e siècle et les péripéties de la lutte entre les Bourbakis et les antiBourbakis.

Les opinions politiques transparaissent aussi. Weil a été contraint de faire sa carrière hors de France, car on lui a reproché son attitude d'« insoumis » en 1939. Cette attitude l'a conduit à la prison de Rouen en 1940. Il a été jugé, condamné, puis amnistié, mais cela a laissé des traces tout au long de sa vie et l'a rendu malheureux de ne pouvoir rentrer en France la tête haute. Le cas de Claude Chevalley est aussi évoqué. Resté hors de France pendant la guerre, ce mathématicien s'est vu reprocher son attitude lorsqu'il a cherché à revenir.

Weil n'aimait pas se mêler de politique, il en fait le reproche à Laurent Schwartz, mais il apporte son soutien à Roger Godement quand celui-ci est victime d'un plasticage pendant la guerre d'Algérie, puis à Laurent Schwartz quand il a été révoqué de son poste de l'École polytechnique. Cartan, lui, est un infatigable défenseur des droits de l'homme et un Européen convaincu.

L'amitié des deux hommes apparaît notamment à travers de pe-

tits services qu'ils s'échangent. Weil demande à Cartan de s'informer de son dossier de retraite ; Cartan demande à Weil de régler quelques notes en dollars. Ces grands mathématiciens sont des hommes comme les autres, ils évoquent leur soucis familiaux, ils échangent des nouvelles de leurs connaissances communes. La correspondance de ces amis, aujourd'hui disparus, montre que les mathématiques sont vivantes parce qu'elles sont le résultat d'activités humaines normales. Profitons de cet ouvrage, car il n'est pas certain que ce type d'échanges perdure.

→ Gérard Tronel

UPMC, Paris

→ MÉDECINE

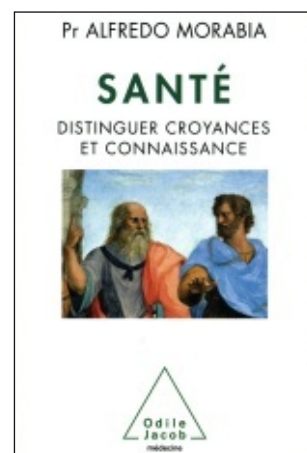
Santé. Distinguer croyances et connaissance

Alfredo Morabia

Odile Jacob, 2011

[320 pages, 23,90 euros].

Vacciner contre l'hépatite B expose-t-il à un risque de sclérose en plaques ? Les PSA, des antigènes spécifiques de la prostate, sont-ils un bon critère de dépistage du cancer de la prostate ? L'usage fréquent du téléphone portable entraîne-t-il un risque de cancer du cerveau ? Que croire dans la masse d'informations qui nous submerge quotidiennement, notamment au travers du Web ? Cette profusion, peu propice à forger une opinion rationnelle sur les grands enjeux de santé, altère la pertinence de notre jugement. D'où l'émergence de croyances, répandues avec une grande célérité et de façon quasi mondiale, qui apportent de (fausses ?) réponses à de vraies questions. Ce livre a pour objec-



tif d'exercer notre regard critique, d'apprendre à lire l'information disponible et à faire la part du vrai et du faux.

Alfredo Morabia est professeur d'épidémiologie à l'Université Columbia de New York et, à ce titre, nous livre son expérience de pédagogue et de spécialiste. Loin d'un cours académique d'épidémiologie, c'est à travers de très nombreux exemples historiques ou tirés de l'actualité récente qu'il décrypte la démarche scientifique. Ces exemples documentés témoignent de l'éclectisme de l'auteur et donnent du piment et de la légèreté à un exposé de prime abord ardu. À travers eux, l'auteur nous livre une leçon de méthodologie.

Remarquable outil pédagogique pour le grand public, les étudiants, mais aussi les scientifiques avertis et les médecins, cet ouvrage aborde, de fil en aiguille, l'ensemble de la démarche épidémiologique. Chaque exemple est analysé et permet de nous familiariser avec le vocabulaire et d'enrichir notre connaissance de concepts nouveaux. Ces bases acquises, un chapitre est consacré au décryptage de l'information brute telle qu'elle nous est livrée au quotidien : de façon pragmatique, l'auteur propose de répondre à quelques ques-

tions simples permettant de séparer l'ivraie du bon grain.

L'ouvrage se termine par une mise en garde. Aborder la santé sous son angle le plus contestable et égocentrique de « ma santé » est une illusion, à l'origine de toutes les dérives et fausses vérités. Seule l'analyse des déterminants de la santé et de la maladie au sein d'une population est source de connaissance avérée. Mais en retour, l'épidémiologie, qu'il s'agisse de soins, de prévention ou de dépistage, et à condition de savoir l'utiliser à bon escient, est la seule voie susceptible d'apporter une réponse satisfaisante à nos problèmes individuels.

→ Bernard Schmitt

Centre hospitalier de Bretagne Sud,
CERNh de Lorient

→ HISTOIRE DE LA PHYSIQUE

L'éther des physiciens existe-t-il ?

Jean-Jacques Samuëli
Ellipses, 2011
(448 pages, 35 euros).

Le concept d'éther a longtemps été présent en physique avant d'être abandonné au début du XX^e siècle. Pour Isaac Newton, il représentait « une espèce d'esprit très subtil » qui permettait d'expliquer la gravitation et la propagation de la lumière. Il pouvait même être plus ou moins identifié à l'espace absolu, quand il n'était pas ce qui transmettait à Dieu la totalité des informations concernant l'Univers ! Repris, modifié, précisé, ce concept d'éther fut ensuite utilisé par la plupart des physiciens qui l'estimaient indispensable pour expliquer nombre de phénomènes, en particulier ceux associés à la propagation de la lu-

mière. Puis vient Albert Einstein. En 1905, ce dernier déclare que « l'introduction d'un « éther lumineux » devient superflue par le fait que [la relativité restreinte] ne fait aucun usage d'un « espace absolu au repos » doué de propriétés particulières ». L'affaire semble réglée. Voici l'éther relégué au rang des concepts obsolètes de la physique, comme l'avait été le phlogistique de la chimie par Lavoisier.

Cette histoire est toutefois trop simple, souligne Jean-Jacques Samuëli, qui présente dans cet ouvrage tout un ensemble de textes historiques abordant cette question de l'éther, de l'Antiquité au milieu du XX^e siècle. Loin d'être le fossoyeur de l'éther, Einstein est aussi celui qui écrit en 1920 : « d'après la théorie de la relativité générale, l'espace est doué de propriétés physiques ; dans ce sens, [...] un éther existe » ; plus loin, Einstein précise « un espace sans éther est inconcevable ».

Alors, l'éther existe-t-il, oui ou non ? Pour J.-J. Samuëli, la réponse est oui : si le nom « éther » n'est plus d'usage chez les physiciens, le concept reste présent, indis-



pensable même. Par exemple, en théorie quantique des champs, le vide, doté de propriétés spécifiques, constitue toujours le support de diverses interactions et,

par conséquent, peut être qualifié d'éther. Ces propriétés pourraient également servir à expliquer certains phénomènes qui semblent contredire le principe de localité en mécanique quantique. Etc.

Bref, en tant que concept servant à décrire les propriétés de l'espace ou du vide, l'éther n'a pas disparu de la physique. Vu sa richesse, il attend encore son historien. Pour l'instant, le lecteur intéressé pourra se tourner utilement vers ce recueil de textes qui lui sont consacrés.

→ Thomas Lepeltier
Université d'Oxford

→ GÉOGRAPHIE

Terre de vignes

Charles Frankel
Seuil, 2011
(297 pages, 21 euros).

Cette terre que nous fait visiter Charles Frankel est à la fois la géographie viticole de la France, aux innombrables vignobles, et sa géologie, aussi variée que ses cépages. Il serait bien sûr simpliste de réduire un terroir aux roches sur lesquelles poussent ses vignes. Les exemples ne manquent pas : en Languedoc, par exemple, les plants qui produisent le Saint-Chinian croissent aussi bien sur de vieux schistes paléozoïques, riches en fossiles de trilobites, que sur des grès et argiles du Crétacé, plus jeunes de 400 millions d'années, qui livrent en abondance des restes de dinosaures.

Ch. Frankel a conscience de la complexité des facteurs qui interviennent dans la production d'un bon vin, et il ne manque pas de rendre hommage au talent des viticulteurs qu'il nous fait rencontrer au cours du périple géologique et géologique auquel nous

Brèves

L'INCROYABLE INSTINCT DES FOURMIS

Bert Hölldobler
et Edward Wilson
Flammarion, 2012 (204 pages, 22 euros).



L'agriculture existait déjà il y a 50 millions d'années... chez les fourmis dites champignonnistes, dont l'étude ne cesse d'étonner. Rassemblées dans cet ouvrage illustré, les plus récentes découvertes sur ces insectes révèlent une société douée d'une organisation minutieuse et structurée. Un bijou d'évolution.



L'OCCULTE

Sabine
Doering-Manteuffel
MSH, 2011
(288 pages, 38 euros).

Enthnologue, l'auteur examine par quels mécanismes l'occulte s'est construit et diffusé, du Moyen Âge à nos jours. Des recettes contre la peste à Wikipedia, en passant par les mystérieux cercles des champs de blé et le mythe aryen, il apparaît que les croyances populaires ne se sont pas construites en marge de la science, mais par transformation de celle-ci et échanges avec elle. Une histoire indissociable de celle... des médias.

DES PLANTES TOXIQUES QUI SOIGNENT

Jacques Fleurentin
et Jean-Claude Hayon
Ouest-France, 2011
(192 pages, 30 euros).

La digitale cardiotonique, la coca anesthésiante, l'éphédra bronchodilatatrice, l'if anticancéreux, sont quelques-unes des plantes toxiques présentées dans ce bel ouvrage. Pour chacune, toxicité, pharmacologie et réglementations sont exposées.



Brèves

FEMMES SANS TÊTES

Gerhard Bosinski
Errance, 2011
(228 pages, 49 euros).



À la fin de l'ère glaciaire, à la place des opulentes vénus préglaciaires, les Européens se sont mis à dessiner et sculpter d'abstraites silhouettes féminines sans têtes ni bras. Elles se ressemblent, du Portugal à la Sibérie. S'agit-il d'images érotiques ? De danseuses ? Voici un beau livre-dossier pour en décider.

NUCLÉAIRE : QUELS SCÉNARIOS POUR LE FUTUR ?

M. Chatelier, P. Criqui, D. Heuer et S. Huet
La Ville Brûle, 2012
(224 pages, 20,30 euros).

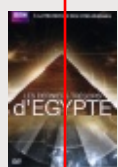
Cette discussion entre deux physiciens (l'un du CEA et l'autre spécialiste des réacteurs de IV^e génération), un économiste de l'énergie et un journaliste couvrant le sujet depuis 30 ans fait le tour du débat sur le nucléaire. On y constate que ces « agents du système » dénoncés par les populistes peuvent être aussi pertinents que nuancés s'agissant de cette question complexe !



LES DERNIERS TRÉSORS D'ÉGYPTÉ

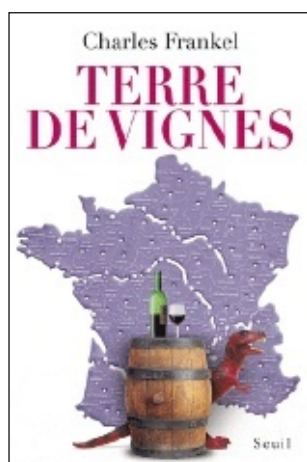
BBC et Discovery Channel, 2011
(12,25 euros).

Il s'agit d'un film qui raconte comment l'archéologue Sarah Parcak a récolté en Égypte une moisson archéologique inouïe en combinant des images satellitaires dans le visible et dans l'infrarouge. La téléarchéologie est arrivée et la civilisation égyptienne se révèle plus immense que nous ne le soupçonnions.



invite son livre. De l'Anjou à la Provence, du Bordelais à l'Alsace, en passant par le Sancerrois, la Champagne, le Beaujolais et bien d'autres régions encore, il nous promène à travers les vignobles français, sans viser à l'exhaustivité, mais en examinant avec perspicacité comment la géologie peut influencer sur le vin. Car ce n'est certes pas l'âge géologique des terrains qui est le facteur principal. La nature de la roche est importante : calcaires, argiles, sables et schistes ne fournissent pas à la vigne les mêmes ingrédients pour sa croissance.

D'autres influences plus subtiles entrent en compte : le relief, qui dépend lui-même de la géologie, détermine l'exposition des parcelles ; les divers sols, issus de l'altération des roches, n'ont pas les mêmes propriétés chimiques et ne sont pas drainés de la même façon. Des facteurs inattendus, aussi : les cailloutis issus de la désagrégation du substrat rocheux emmagasinent la chaleur pendant le



jour et la restituent la nuit, influençant ainsi la maturation du raisin. La géologie joue donc un rôle non négligeable dans l'alchimie qui produit un vin.

L'excellent livre de Ch. Frankel peut être savouré chez soi, en même temps qu'une bonne bouteille, ou emporté avec soi « sur le

terrain », pour découvrir en même temps les richesses cénologiques et géologiques de la France.

→ Eric Buffetaut

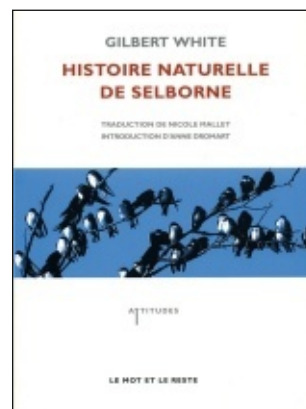
CNRS, Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure, Paris

→ HISTOIRE NATURELLE

Histoire naturelle de Selborne

Gilbert White

Le Mot et le Reste, 2011
(320 pages, 23 euros).



tiquer des dissections et à comparer ses résultats à ceux des autres anatomistes.

L'Histoire naturelle de Selborne est l'un des livres les plus édités au Royaume-Uni après la Bible et Shakespeare. Tous les naturalistes britanniques l'ont lu, tel Charles Darwin qui consacre un ouvrage à répondre à une question posée par White au sujet du rôle des lombrics dans la formation de la terre végétale. Plus qu'un simple jalon de l'histoire de l'édition naturaliste, ce recueil de lettres, en ce qu'il montre des animaux dans leurs multiples relations avec leur environnement, est une réelle ébauche d'une pensée écologique. Son succès permet de mieux saisir la passion et l'affection qui caractérisent les relations des Britanniques avec la nature.

Il faut féliciter le travail accompli par la traductrice, Nicole Mallet, et par l'éditeur, Le Mot et le Reste, qui viennent, pour la première fois, de rendre accessible en français cet envoûtant ouvrage. Enfin !

→ Valérie Chansigaud

Historienne des sciences de l'environnement



Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur :
www.pourlascience.fr