

BATTRE L'ORDINATEUR : quand l'union fait la force

■ POUR LA

SCIENCE

Janvier 2013 - n° 423

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Quel avenir pour la mer Morte ?

**Monde discret
ou continu ?**Ce que la physique
quantique en dit**Le loup domestiqué**Comment l'homme
a créé le chien**Le béton d'argile**Pourquoi les constructions
en terre sont si solides

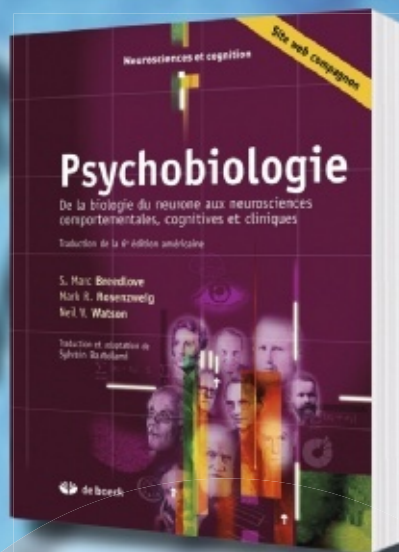
Allemagne : 9,30 € - Belgique : 7,20 € - Canada / S : 10,95 CAD - Grèce / S : 7,60 € - Guadeloupe / St Martin / S : 7,30 €
- Guyane / S : 7,30 € - Italie : 7,20 € - Luxembourg : 7,20 € - Maroc : 60 MAD - Martinique / S : 7,30 € - Nlle Calédonie Wallis / S : 980 XPF
- Polynésie Française / S : 980 XPF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

M 02687 - 423 - F : 6,20 €



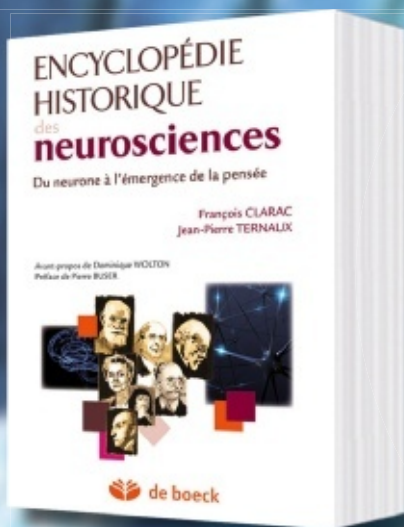
Une introduction
aux **NEUROSCIENCES
COMPORTEMENTALES**

Breedlove • Rosenzweig • Watson
760 pages • 60 €



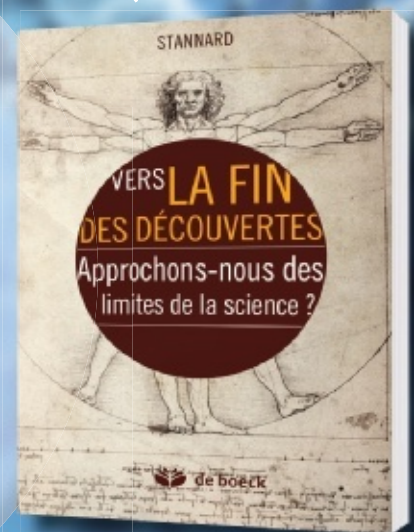
Approchons-nous des
LIMITES DE LA SCIENCE ?

DES LIVRES POUR ALLER PLUS LOIN



Clarac • Ternaux
1042 pages • 75 €

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



Stannard • 323 pages • 19 €



Thomas • Lefèvre • Raymond
840 pages • 90 €

Tous les concepts
de la biologie évolutive
LA référence

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 Tacquenot,
Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe assisté de Yoan Bassinet

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 : François Arleo,
Michel Campillo, Olivier Darrigol, Cécile Fourrage,
Sophie Gallé-Soas, Étienne Hirsch, Nicholas Jeffery,
Jean-Claude Lacaille, Sylvestre Maurice, Christophe Pichon,
Daniel Tacquenot, François Valla

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

(j.f.guillotin@pourlascience.fr)

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-oies - 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

Mémoires

Le futur appartient à celui qui a la plus longue mémoire.
Friedrich Nietzsche

La mémoire se construit par accumulation, sélection, rappel, modifications, oubli des souvenirs. Plus on dispose d'une « longue mémoire », autrement dit d'une mémoire riche, mieux on est armé pour préparer l'avenir. Pour les neurobiologistes, il existe deux types de mémoire, la mémoire à long terme permettant de stocker les événements vécus, les connaissances, les savoir-faire, tout ce qui façonne l'histoire personnelle. Et la mémoire dite de travail qui stocke momentanément une information utile dans un avenir immédiat, mais qu'il serait sans intérêt de retenir longtemps. Sans mémoire de travail, toute anticipation devient impossible. Mais pour le philosophe, sans mémoire à long terme, pas de futur non plus.

Ces constatations trouvent des applications dans l'exploration scientifique. Ainsi, les sédiments sont la mémoire de divers environnements naturels. C'est notamment le cas des fonds de la mer Morte. En étudiant des carottes sédimentaires prélevées sous cette étendue d'eau dont la salinité est dix fois supérieure à celle des océans ouverts,

Sans mémoire, aucune anticipation possible.

les géologues sondent la mémoire des sols et retracent l'histoire de cette mer fermée. Ce faisant, ils envisagent des solutions qui éviteraient la disparition de cet écosystème unique. L'histoire de la mer Morte devient une des clés de son avenir (voir *La mer Morte racontée par ses fonds*, page 28).

C'est aussi le cas des constructions de terre en place depuis des siècles. Comment un tel « béton naturel » peut-il résister si efficacement aux intempéries ? Des villes, des immeubles de dix étages au Yémen, les murs d'enceinte de l'Alhambra, en Andalousie, ne sont constitués que de terre et d'argile. En étudiant la physique à l'œuvre dans ces témoins du passé, on anticipera mieux les défis que pose la possibilité de loger de façon « durable » une population mondiale qui continue à croître (voir *La terre, un béton d'argile*, page 50).

Enfin, le chien témoigne de la longue coévolution de l'homme et des animaux domestiques. Mais ici la mémoire est trompeuse, puisque le chien n'est qu'un avatar du loup, et que c'est le loup qui a été domestiqué (voir *La domestication du loup*, page 42). Ces informations réactualisent notre mémoire qui, on le sait, évolue avec le temps. ■

1
4

ÉDITO

BLOC-NOTES

Didier Nordon

Actualités

6

Autisme : une même cause pour différentes formes ?

8

Choyer ses neveux plutôt que ses enfants

9

Les profondeurs de la Terre révélées par le bruit sismique

10

Prendre la température d'un plasma quarks-gluons

... et bien d'autres sujets.

Opinions

14

POINT DE VUE

Évaluation de la science : n'ayons pas peur de l'élection !

Philippe Büttgen

15

DÉVELOPPEMENT DURABLE

La progressivité des prix de l'énergie sera-t-elle efficace ?

Boris Solier

17

VRAI OU FAUX

Les plantes communiquent-elles ?

C. Lenne, O. Bodeau et B. Mouliat

18

QUESTIONS OUVERTES

Peut-on parler d'addiction au sucre ?

Serge Ahmed

La consommation de sucre serait responsable de comportements pathologiques qui s'apparentent à une addiction. Toutefois, rien ne permet aujourd'hui de les détecter.

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science* brochés sur la totalité du tirage.
En couverture : © NASA/Corbis

À LA UNE

22

ENVIRONNEMENT

La mer Morte vivra-t-elle ?

Eitan Haddok

L'irrigation et l'extraction de minerais conduisent à l'assèchement de la mer Morte. Mais en s'associant, Israël, la Jordanie et l'Autorité palestinienne peuvent encore sauver cet exceptionnel lac salé.

28

GÉOLOGIE

La mer Morte racontée par ses fonds

D. Ariztegui, M. Stein, Z. Ben-Avraham et N. Waldmann

Des carottes de sédiments longues de plusieurs centaines de mètres ont été récemment prélevées au fond de la mer Morte. Leur analyse, qui devrait préciser 200 000 ans d'évolution géologique et climatique du lac, a d'ores et déjà révélé quelques surprises.



36

PHYSIQUE THÉORIQUE

Quantique, mais non discret

David Tong

Bon nombre de physiciens théoriciens soutiennent une vision pointilliste du monde aux plus petites échelles. Toutefois, un examen des lois de la nature suggère un monde physique continu.

42

ZOOLOGIE

La domestication du loup

Pierre Jouventin

Il y a plus de 30 000 ans, des groupes de chasseurs préhistoriques auraient intégré en leur sein des louveteaux. Ainsi se serait enclenché le processus qui, à partir de ce fauve foncièrement social qu'est le loup, a engendré le chien.

50 PHYSICO-CHIMIE**La terre, un béton d'argile***Henri Van Damme*

Pourquoi la terre constitue-t-elle un matériau de construction si universel et si robuste ? L'explication réside dans les forces capillaires qui font tenir les châteaux de sable et les forces électrostatiques s'exerçant au sein de l'argile.



© ADRI VAN NISSEN/ISTOCK.COM

58 PALÉONTOLOGIE HUMAINE**Le premier de notre genre ?***Kate Wong*

Les étonnantes fossiles de *Australopithecus sediba*, une nouvelle espèce d'australopithèques sud-africains, nourrissent le débat sur l'origine du genre humain et son lieu d'apparition.

**66 BIOCHIMIE****Les porphyrines : les couleurs de la vie***Franck Dayan et Emilie Dayan*

Des pigments biologiques, les porphyrines, sont des molécules essentielles du vivant. Leur étude nourrit des domaines aussi variés que la médecine, l'agronomie ou le photovoltaïque.

Regards**74****HISTOIRE DES SCIENCES****Herschel et l'énigme de l'infrarouge***Jack White*

L'astronome William Herschel a découvert le rayonnement infrarouge. Il a même deviné sa nature.

80**LOGIQUE & CALCUL****L'homme, meilleur joueur que la machine***Jean-Paul Delahaye*

Avec une bonne coordination, l'intelligence humaine fait parfois mieux que les ordinateurs.

86**SCIENCE & FICTION****Alien : enquête sur un monstre culte de la SF***J.-S. Steyer et R. Lehoucq***88****ART & SCIENCE****Promenade géologique en Terre du Milieu***Loïc Mangin***90****IDÉES DE PHYSIQUE****Un saut en hauteur... de 39 km***Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik***93****SCIENCE & GASTRONOMIE****Des gelées à mâcher***Hervé This***94****A LIRE****Rendez-vous sur**

POUR LA

SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

Toutes les sciences en un clic

- Des actualités quotidiennes
- Des articles en libre accès
- Votre magazine numérique en ligne*
- Plus de 8 ans d'archives*

Des services exclusifs

- Les réactions aux articles**
- Des offres d'emploi scientifiques
- Des newsletters**
- Un espace abonnement

* Service payant. Si vous êtes abonné(e), les numéros compris dans votre abonnement sont offerts.
** En créant votre compte.

→ EMPHATIQUES

MATHÉMATIQUES

Les mots savants abondent pour désigner les « tropes » – c'est-à-dire les figures de style dans lesquelles un mot est détourné de son sens propre. Personne, pourtant, ne semble avoir songé au mathématope. À nous de l'introduire, donc. Ce procédé consiste à utiliser des termes mathématiques pour donner de l'emphase à un texte.

L'hiver dernier, par exemple, on a lu dans les journaux : « Alors que la vague de froid ne faiblit pas en France, les morts se multiplient. » En vérité, les morts ne se multiplient ni au sens arithmétique du terme ni au sens biologique. Ils peuvent tout au plus s'additionner. Mais titrer « Les morts s'additionnent » aurait été moins frappant.

Jadis, pour impressionner le public, on le mettait en garde contre quelque phénomène « en progression géométrique ». L'effet s'étant atténué, on recourt désormais à l'exponentielle – et même plus. Ainsi ai-je lu que les documentaires animaliers « se multiplient de manière exponentielle ». Cette conjugaison de l'exponentielle avec la multiplication ne relève pas de la science, mais de la rhétorique : l'auteur veut retenir l'attention. Je ne désespère pas de voir un jour la presse s'alarmer parce que les incivilités (ou Dieu sait quel fléau) « s'additionnent de manière exponentielle ».

Lorsqu'un écrivain emploie un mathématope, les opérations élémentaires lui suffisent. Goethe écrit dans *Wilhelm Meister, Les Années d'apprentissage* : « C'étaient

des hommes intelligents, spirituels, vivants, qui voyaient bien que la somme de notre existence, divisée par la raison, ne se réduisait jamais exactement, mais qu'il restait toujours une fraction bizarre. »

Les mathématiciens savent aussi tirer effet des opérations élémentaires. Cédric Villani admire la preuve par ordinateur du théorème des quatre couleurs : simple, efficace, belle, elle a été « écrite par un humain à 0,2 pour cent, complétée par la machine à 99,8 pour cent », mais ce sont bien les 0,2 pour cent humains qui comptent » (*Théorème vivant*, Grasset, 2012). Pris au pied de la lettre (au pied du chiffre, plutôt), ces pourcentages précis sont aberrants, mais, en tant que procédé littéraire pour exprimer de l'enthousiasme, ils ont toute la légitimité d'un mathématope... démonstratif.



La chimie trouve dans le temps une source d'exercices pour tester ses méthodes de datation.

En mécanique, le temps s'appelle t et sert à calculer des dérivées.

Mention spéciale pour l'informatique. L'affichage du temps qui reste avant qu'un document soit téléchargé augmente parfois au lieu de diminuer. Ainsi, l'informatique est la seule science capable d'inverser la flèche du temps à l'échelle macroscopique.

Enfin, l'écrivain russe Mikhaïl Chichkine évoque ainsi les trois temps de la grammaire : « On ne vous a donc rien appris à l'école ? On ne vous a pas appris qu'il y a un passé, un absent et un futur ? » (*Deux heures moins dix*, Éditions Noir sur Blanc, 2012).

→ Ô TEMPS,

SUSPENDS TES SENS !

Personne n'a jamais le temps, mais chaque science a son temps.

La géologie considère le temps comme un manœuvre chargé, à grands coups de millions d'années, de construire, de détruire, de reconstruire...

L'histoire élève le temps au rang de dieu créateur qui, époque après époque, fait émerger des conceptions inédites et des formes politiques inattendues.

La métaphysique envisage l'inconcevable infinité du temps, et ne cesse de s'en effrayer. L'astrophysique envisage des durées tellement inconcevables que le temps cesse d'effrayer.

L'économie voit le temps comme un faiseur de miracles : il suffit qu'il passe pour qu'un capital initial s'accroisse d'intérêts substantiels.

Les mathématiques, domaine des vérités éternelles, ignorent le temps.

En biologie, le temps est un meurtrier infatigable.

La physique donnerait cher pour savoir quel moteur fait avancer le temps.

→ ABSTRACTION CRÉATRICE

Une formule scientifique n'est pas plus mystérieuse qu'une abréviation. Elle repose, en fin de compte, sur des mots courants. Par exemple, l'expression $\sum 1/n^2$ pourrait être lue : « La somme des inverses des carrés des nombres entiers. » En fait, un scientifique dit de façon lapidaire : « Sigma de un sur enne deux. » S'il lisait les formules en en déployant chaque signe jusqu'à l'exprimer à l'aide de mots usuels, il s'y perdrait. Pour comprendre, il a besoin d'abréger.

Dans d'autres activités, le besoin d'abréger est satisfait par des mots savants : un philosophe ne repense pas les mots ontologie ou immanence chaque fois



qu'il les emploie, un économiste ne relit pas Keynes avant de dire que telle mesure est keynésienne. On ne peut pas manier une synthèse tout en réexaminant encore et toujours les détails de l'analyse. Une fois qu'on a saisi les éléments d'un corpus, on doit les occulter pour ne pas se laisser submerger par eux : on fait de ce corpus un bloc, qu'on agence avec d'autres blocs pour aller plus loin.

L'étrange besoin qu'a l'esprit de court-circuiter les détails d'une étape pour pouvoir s'appuyer sur celle-ci confère aux abréviations une étrange puissance créatrice. Une formule scientifique n'est pas moins mystérieuse qu'une abréviation.

→ RECHERCHE ORACLE SOURD

Soyez nuancé, acceptez l'éventuelle pertinence des objections qui vous sont opposées, changez d'idée sans en faire un drame si on vous montre que vous vous êtes trompé. Vous passerez peut-être pour intelligent et adaptable, peut-être pour versatile, mais sûrement pas pour un oracle.

Soyez carré. Rejetez toute critique. Parlez plus fort que quiconque vous parle. Quoi que vous ayez dit, tenez-vous y. Vous passerez peut-être pour une brute, mais on saluera votre constance, votre caractère bien affirmé. À vous voir inébranlable, on déduira que vos positions sont solides, on vous percevra comme un point stable, et on se déterminera par rapport à vous.

Le monde n'écoute que les sourds. ■



Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

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

Preservation of Plastic Artefacts in Museum Collections

Preservation of Plastic Artefacts in Museum Collections

Édité par Bertrand Lavédrine, Alban Fournier et Graham Martin

328 pages, ill. couleur, 50,70 €

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

isbn 978-2-7355-0770-2

FRANÇOIS BORDES ET LA PRÉHISTOIRE



François Bordes et la préhistoire

Sous la direction de Françoise Delpech et Jacques Jaubert

232 pages, ill. couleur, 45 €

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

isbn 978-2-7355-0766-5

Les arpenteurs des confins



Les arpenteurs des confins Explorateurs de l'intérieur de la Guyane (1720-1860)

Textes réunis et présentés par Francis Dupuy

296 pages, ill. noir et blanc, 40 €

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

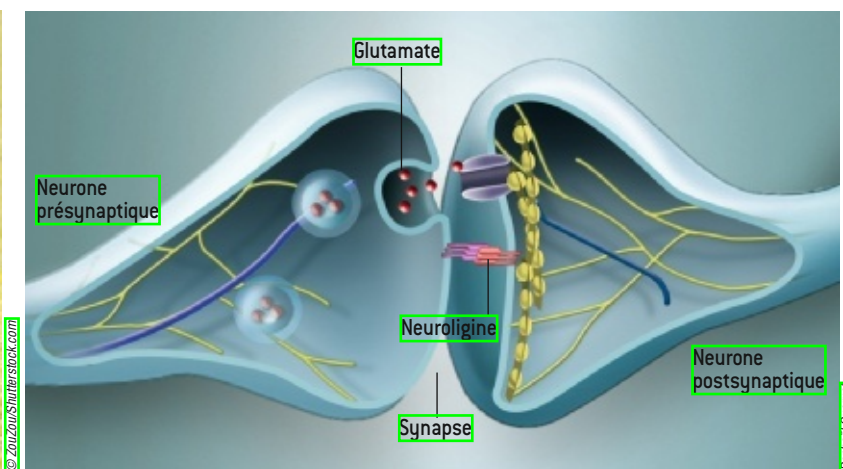
isbn 978-2-7355-0758-0

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

Neurobiologie

Autisme : une même cause pour différentes formes ?

À l'aide d'un nouveau modèle animal de l'autisme, des biologistes ont montré qu'un même mécanisme pourrait être la cause des troubles autistiques associés à diverses mutations.



Les troubles autistiques sont souvent associés à une hyperconnectivité des circuits neuronaux de certaines aires cérébrales. Or ce haut degré de connexion serait, dans certains cas, dû à un dérèglement de la traduction des gènes codant les neurotrophines. Ces protéines d'adhérence jouent un rôle majeur dans l'établissement des synapses glutamatergiques, synapses qui fonctionnent par transmission de molécules de glutamate, le principal neurotransmetteur exciteur présent dans le cerveau.

A lors que la précision des critères du diagnostic de l'autisme est au cœur des réflexions qui entourent la révision de l'ouvrage de référence sur les troubles mentaux, le *Manuel statistique et diagnostique des troubles mentaux* (la nouvelle édition, le DSM-V, sera publiée en mai 2013), une étude apporte une meilleure compréhension de la biologie des troubles du spectre autistique. Christos Gkogkas, de l'Université McGill à Montréal, et ses collègues ont mis au point un nouveau modèle animal de ces troubles, puis ont fait disparaître les symptômes autistiques de leurs animaux modèles.

L'autisme touche près d'une personne sur 100 dans le monde. Si ses causes génétiques sont multiples, deux caractéristiques se retrouvent dans de nombreux cas : d'une part, dans diverses régions du cerveau (hippocampe, cortex préfrontal et frontal...), les circuits neuronaux sont hyperconnectés ; d'autre part, dans plusieurs cas liés à des mutations, la machinerie moléculaire de traduction du code génétique est dérégulée. Tiendrait-on là un mécanisme commun aux différentes formes d'autisme ? La multiplication des

connexions neuronales serait-elle due à la dérégulation de la traduction des gènes ?

L'hypothèse est d'autant plus séduisante que, par ailleurs, une famille de protéines d'adhérence localisées dans les synapses et impliquées dans la connexion des neurones, les neurotrophines, a aussi été associée à des troubles autistiques : plusieurs mutations sur des gènes codant ces protéines ont été détectées chez des personnes autistes, et leur rôle dans l'autisme a été confirmé chez l'animal. Les neurotrophines seraient-elles le maillon qui relierait la dérégulation de la traduction génique et l'hyperconnectivité neuronale ?

C'est cette hypothèse que l'équipe québéco-américaine a confirmée par son modèle animal. Les biologistes ont produit des souris génétiquement modifiées pour que leur génome ne contienne plus le gène *Eif4ebp2*. Ce gène code une protéine qui bloque la traduction d'ARN messagers, les intermédiaires de la traduction des gènes en protéines. Ainsi, chez ces souris, la traduction de ces ARN messagers n'est plus réprimée, et les protéines synthétisées à partir de ces ARN messagers sont produites en

excès. Parmi elles se trouvent... les neurotrophines.

Les souris produites présentent de nombreux symptômes associés à l'autisme : faible interaction sociale, communication altérée, comportements répétitifs. En outre, l'analyse de l'activité neuronale de l'hippocampe dans des coupes de cerveau a révélé que les neurones de ces souris étaient hyperconnectés. Enfin, une action directe sur la synthèse des neurotrophines – la répression de la traduction des ARN messagers associés – supprime les symptômes autistiques des souris. Ainsi, pour la première fois, un lien entre hyperconnectivité neuronale et dérégulation de la synthèse de protéines est établi, via la surproduction des neurotrophines.

Ce mécanisme explique peut-être les troubles autistiques associés à diverses mutations. Les biologistes vont tester cette hypothèse sur des modèles animaux de l'autisme construits à partir de diverses mutations génétiques impliquées dans ces troubles : des mutations en amont de la traduction des ARN messagers, mais aussi en aval, dans l'espoir de trouver de nouvelles cibles thérapeutiques.

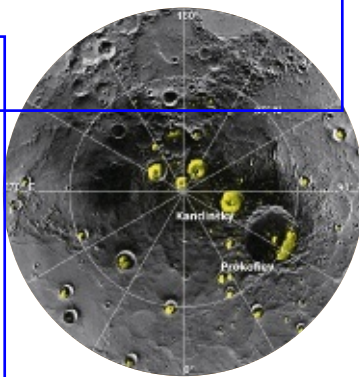
→ Marie-Neige Cordonnier
Nature, en ligne le 21 novembre 2012

Planétologie

De la glace d'eau sur Mercure

Sur Mercure, la température monte à 400 °C le jour. Pourtant, on soupçonnait la présence de glace d'eau sur la planète, dans des zones plongées dans l'ombre en permanence. Cette présence a été confirmée par trois études, qui exploient les données de la sonde *Messenger*, mise en orbite autour de Mercure en 2011.

En 1991, le radiotélescope d'Arecibo, à Puerto Rico, avait repéré des zones brillantes près des pôles. Ces zones, situées au fond de cratères d'impact, ont été analysées dans la première étude à l'aide d'un spectromètre à neutrons. Elles abritent une



Près du pôle Nord de Mercure, de grands dépôts de glace d'eau (en jaune) tapissent le fond de certains cratères d'impact, perpétuellement à l'ombre.

couche de glace d'eau d'environ 10 centimètres d'épaisseur, enterrée sous une couche de poussière de 10 à 20 centimètres en moyenne.

Selon la deuxième étude, cette glace affleurerait en certains endroits qui réfléchissent bien les impulsions infrarouges émises par la sonde. Enfin, la troisième étude a permis d'estimer les températures de surface et de confirmer qu'elles sont compatibles avec de la glace d'eau. Quelque 10 à 1 000 milliards de tonnes de cette glace auraient été apportées sur la planète par des météorites.

→ Guillaume Jacquemont

Science Express, en ligne, 29 novembre 2012

En bref

LE PREMIER PORT DE ROME

Au I^{er} siècle, l'empereur Claude a fait construire un nouveau port de Rome pour bateaux hauturiers à Portus, au Nord d'Ostie, mais on ignorait où se trouvait l'ancien. Ce port oublié vient d'être retrouvé par une équipe franco-italienne au Nord-Ouest d'Ostie, sur la rive gauche de l'embouchure du Tibre. Son bassin était profond de six mètres. Fondé, d'après les textes anciens, entre le IV^e et le II^e siècles avant notre ère par le quatrième roi de Rome, il était manifestement aussi destiné à accueillir des navires hauturiers.

LE SPERME EN DÉCLIN

La qualité du sperme baisse en France, montre une étude fondée sur un grand nombre d'échantillons collectés auprès de centres d'assistance médicale à la procréation – et pour lesquels l'infertilité du couple ayant conduit au dépôt de sperme provenait de la femme. La concentration en spermatozoïdes a diminué de 32,2 pour cent entre 1989 et 2005 : elle est passée de 73,6 à 49,9 millions par millilitre pour un homme de 35 ans. En outre, de plus en plus de spermatozoïdes ont une forme anormale.

FERTILES ANNEAUX...

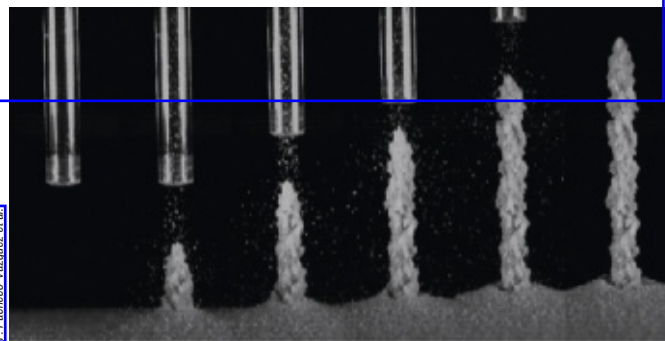
Plusieurs hypothèses existent sur l'origine des satellites des planètes : collision géante, accréation dans une nébuleuse entourant la planète en formation... Selon une simulation numérique française, les satellites se formeraient plutôt à partir d'anneaux qui se mettent en place plus tardivement, tels ceux visibles aujourd'hui autour de Saturne. Ces anneaux s'étalent et lorsqu'ils dépassent une limite dite de Roche, les couches externes s'agrégeraient en satellites.

Physique

Des tours de sable construites grain par grain

Tout l'art de faire des châteaux de sable réside dans la quantité d'eau mélangée au sable. Avec trop d'eau ou pas assez, les grains de sable ne se lient pas entre eux. L'eau s'intercale entre deux grains et établit un pont capillaire, qui crée une force de cohésion – due à la tension de surface du liquide. Felipe Pacheco-Vázquez, Florian Moreau et leurs collègues de l'Université de Liège se sont intéressés aux conditions optimales pour la cohésion entre les grains. Ils ont étudié le cas de structures qui se forment lorsqu'on verse des grains secs sur du sable plus ou moins mouillé et ont identifié les conditions limites de stabilité de ces édifices.

Les physiciens sont parvenus à former des tours étroites, de plus de 12 centimètres pour moins d'un centimètre de large. Les conditions pour que de telles tours se forment sont multiples. Notamment, le liquide doit pouvoir percoler vers le haut de la tour de sable, et le sable sec qui est versé au sommet doit pouvoir s'accrocher à la tour en formant des ponts



En empilant doucement du sable sur un sol humide, on peut former des tours qui peuvent atteindre plus d'une dizaine de centimètres de hauteur.

capillaires. La hauteur maximale théorique des tours dépasse cependant celle des édifices obtenus expérimentalement. En effet, la base des tours expérimentales cède sous le poids de l'édifice et la pression d'impact des grains secs qui bombardent le sommet. En prenant en compte ces contraintes, les prévisions théoriques s'accordent avec les résultats obtenus.

Ces tours, spectaculaires par leur étroitesse, ne ressemblent pas aux châteaux de sable que l'on construit sur la plage. Cependant,

on observe parfois de telles structures dans la nature. Au Mexique, une espèce de fourmis a tendance à accumuler des grains de terre, fruit de l'excavation des tunnels, à l'entrée de la fourmilière. En période de sécheresse, ces tas forment des petites pyramides. Mais en période de pluie, les grains adhèrent les uns aux autres et s'assemblent pour former des tours d'une dizaine de centimètres de hauteur.

→ Sean Bailly

F. Pacheco-Vázquez et al., *Physical Review E*, vol. 86, 051303, 2012

Anthropologie

Choyer ses neveux plutôt que ses enfants

Du point de vue génétique, un homme a-t-il intérêt à choyer les enfants de ses sœurs plutôt que ceux de son épouse? L'étude quantitative d'Alan Rogers, de l'Université de l'Utah, tend à le montrer, du moins pour les populations où l'adultère est répandu ou admis.

Dans le monde animal, les soins prodigués aux petits sont souvent liés à la parenté génétique : pour perpétuer ses gènes, un individu a intérêt à investir dans les congénères qui lui sont génétiquement proches. Cette hypothèse sociobiologique s'applique-t-elle aux humains ? Dans les sociétés où l'infidélité est fréquente, un homme aurait alors intérêt à prendre soin

des enfants de ses sœurs, avec lesquels il est sûr d'avoir un patrimoine génétique en partie commun, plutôt que des enfants de sa propre épouse, qui risquent d'être ceux d'un autre homme et donc d'être génétiquement étrangers.

Dans les années 1970, plusieurs analyses théoriques ont testé cette hypothèse sociobiologique, avancée pour expliquer les observations des ethnologues. D'après le modèle dominant, l'hypothèse serait valide si la probabilité p qu'un homme soit le père biologique de l'enfant de son épouse est inférieure à environ 0,27 – une valeur trop faible pour être crédible. L'investissement dans les enfants des sœurs est donc resté un problème non résolu.

Or l'anthropologue A. Rogers a montré que les modèles s'appuyaient sur des hypothèses trop restrictives, et de ce fait sous-estimaient la proximité génétique d'un homme avec les enfants de ses sœurs. En corrigeant ces biais et en tenant compte d'autres paramètres, tel le nombre de partenaires extraconjugaux d'une femme, A. Rogers trouve que l'investissement préférentiel dans les neveux peut se justifier si la probabilité p de paternité est inférieure à $1/2$, valeur beaucoup plus réaliste. L'hypothèse sociobiologique en question en ressort bien plus plausible.

→ Maurice Mashaal

Proc. of the Roy. Soc. B, vol. 280, 1751, 2013



Dans les sociétés où l'infidélité des couples est répandue, voire normale, un homme diffuserait mieux ses gènes s'il s'occupe davantage de ses neveux du côté de ses sœurs que des enfants de son épouse.

35,6 MILLIARDS DE TONNES: c'est la masse des émissions de CO₂ estimées en 2012. Soit 58 pour cent de plus qu'en 1990, et 2,6 pour cent de plus qu'en 2011.

Archéologie

Le trésor d'un collaborateur gaulois

Il faut payer la milice. En attendant le jour de la solde, son chef cache l'argent chez lui, mais l'homme disparaît. Une équipe de l'INRAP, l'Institut national de recherches archéologiques préventives, a retrouvé 2 030 ans plus tard ce trésor gaulois.

L'équipe, dirigée par Jean-Denis Laffite et Laurent Thomas, était venue à Basing, en Moselle, en plein territoire des Médiomatriques, un peuple de la Gaule belgique, sauver les restes d'une ferme aristocratique. Elle a mis au jour un témoignage frappant de la collaboration d'une partie des élites gauloises avec les Romains. Outre des restes d'insignes et d'armes romaines et gauloises, attestant de la présence d'une troupe militaire gauloise romanisée, les archéologues ont retrouvé 1 111 pièces gauloises

d'argent, 3 d'or et 51 de bronze. Plusieurs interprétations sont possibles : soit le commerce du blé entrepris avec les légions pendant la campagne d'Alésia (en 52 avant notre ère) a beaucoup enrichi le chevalier de Basing

(César nommait « chevaliers » les aristocrates guerriers gaulois), soit les Romains lui avaient procuré de quoi payer la milice d'auxiliaires qu'ils lui demandaient d'entretenir pour les aider à pacifier les Gaules.



Or les monnaies découvertes à Bassing ont été émises pour la plupart dans les années 50 à 30 avant notre ère. Le trésor, qui représenterait trois à cinq ans de la solde d'un militaire romain, aurait été dissimulé dans les années 30 à 20. En supposant les auxiliaires gaulois moins payés que les légionnaires et seulement pendant la saison coutumière de la guerre (la moitié du temps), et que le trésor était probablement deux fois plus important à l'origine (car il a été dispersé par les labours successifs dès le Moyen Âge), on peut penser que le propriétaire du dépôt avait caché la solde annuelle d'une vingtaine d'auxiliaires gaulois.

→ Francois Savatier

www.inrap.fr, communiqué du 30 novembre 2012

Biochimie

La couleur du dahlia noir

Les dahlias noirs sont une curiosité botanique : sur plus de 20 000 cultivars (ou variétés cultivées) de dahlias aux fleurs blanches, jaunes, orange ou rouges, quelques espèces seulement ont des fleurs si sombres qu'elles paraissent noires. Les pigments en jeu sont les anthocyanines rouges et les anthochlores jaunes ainsi que les copigments, flavones ou flavonols, qui stabilisent la structure des molécules de pigments. Jana Thill, de l'Université de Vienne, et ses collègues ont identifié les mécanismes de synthèse des pigments responsables de la teinte exceptionnelle.

Les chercheurs ont étudié 14 cultivars noirs. Ils ont montré que la couleur résulte d'une forte concentration d'anthocyanines, 4 à 30 fois supérieure à celle des dahlias rouges. Pourquoi une accumulation aussi importante dans ces fleurs ? J. Thill et ses collègues ont observé que l'activité enzymatique de production des flavones est réduite dans ces cultivars. Or la biosynthèse des anthocyanines et celle des flavones sont des processus en compétition : ils requièrent des composés intermédiaires identiques. Ainsi, l'absence de flavones profite à la synthèse d'anthocyanines qui s'accumulent en grandes quantités.



→ S. B.

J. Thill et al., BMC Plant Biology, vol. 12, 225, 2012

La teinte presque noire de ces dahlias résulte d'une accumulation de pigments.

Microbiologie

Bactéries subantarctiques

Le lac Vida, en Antarctique, renferme de l'eau liquide sous 20 mètres de glace. Peter Doran, de l'Université de l'Illinois à Chicago, et ses collègues ont effectué deux campagnes de sondages en 2005 et en 2010 pour étudier sa composition. Ils ont découvert une grande diversité de bactéries qui se développent dans des conditions extrêmes.

Ces organismes vivent par une température de -13°C , sans lumière, dans une eau dépourvue d'oxygène et six fois plus salée que l'eau de mer. De plus, le lac liquide est isolé de l'extérieur depuis 2 800 ans. Les bactéries ne peuvent donc puiser leur énergie que dans les ressources internes du lac. Elles n'ont cependant pas épuisé ces réserves, car leur métabolisme est ralenti, en raison de la basse température. En outre, la teneur élevée en dihydrogène (H_2) dans l'eau indique que des réactions de serpentinisation s'y dérouleraient (il s'agit d'une réaction d'oxydation anaérobie entre l'eau et les ions fer qui y sont dissous). Cela ferait vivre plusieurs espèces de bactéries du lac qui peuvent utiliser le dihydrogène comme source d'énergie.

→ S. B.

A. E. Murray, PNAS, en ligne, 26 novembre 2012

Géophysique

Les profondeurs de la Terre révélées par le bruit sismique

En permanence, la Terre vibre faiblement sous les coups des multiples phénomènes transitoires qui agitent sa surface : interactions de la houle avec la terre ferme, microséismes, etc. On sait depuis peu utiliser ce « bruit de fond sismique » pour caractériser les structures géologiques superficielles. Piero Poli, de l'Université de Grenoble, et ses collègues ont montré qu'il pouvait aussi révéler des structures plus profondes : grâce à l'analyse du bruit sismique enregistré par 42 sismographes installés en Finlande, ils ont mis en évidence la zone dite de transition, qui sépare le manteau supérieur du manteau inférieur.

La plupart de nos connaissances sur les profondeurs terrestres proviennent de l'étude des ondes sismiques émises par les tremblements de terre. La façon dont elles se propagent, et notamment leur vitesse, est en effet caractéristique des roches traversées. Il y a quelques années, une méthode alternative a fait son apparition, fondée sur l'étude du bruit sismique. Bien que de faible amplitude, ce bruit est permanent et réparti de façon plus homogène que les séismes. En mesurant les corrélations entre les signaux de bruit reçus par des sismographes situés en différents

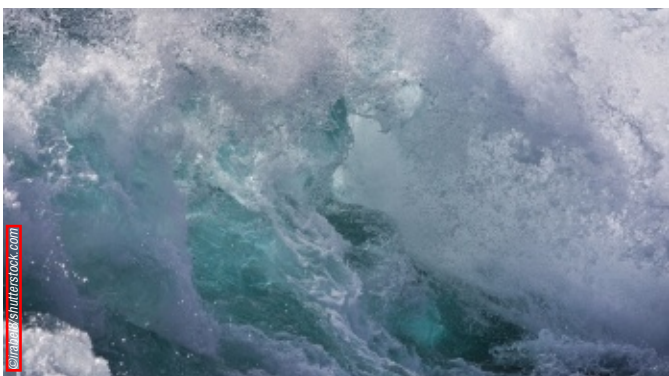
endroits, les sismologues reconstituent les structures géologiques traversées.

Certains chercheurs pensaient que cette méthode ne pouvait révéler que des structures peu profondes. En effet, le signal de bruit capté par les sismographes est dominé par des ondes dites de surface, qui se propagent dans les couches superficielles de la Terre ; dès lors, la contribution des ondes dites de volume, qui ont pénétré dans les profondeurs et s'y sont réfléchies, était indécidable.

En retranchant la contribution des ondes de surface au signal, P. Poli et ses collègues sont parvenus à mettre en évidence celle des ondes de volume. Ils ont ainsi révélé des ondes sismiques réfléchies par deux discontinuités à 410 et 660 kilomètres de profondeur. Ces discontinuités marquent le début et la fin de la zone de transition entre le manteau supérieur et le manteau inférieur, et se caractérisent par un changement de structure minéralogique des roches. La zone de transition étant déjà connue, l'intérêt de cette étude réside surtout dans les perspectives ouvertes : désormais, une nouvelle méthode d'analyse des structures profondes de la Terre est disponible.

→ G. J.

Science, en ligne le 23 novembre 2012



Les vagues qui s'entrechoquent constituent l'une des principales contributions au bruit sismique, les vibrations engendrées étant transmises au fond océanique par la colonne d'eau.

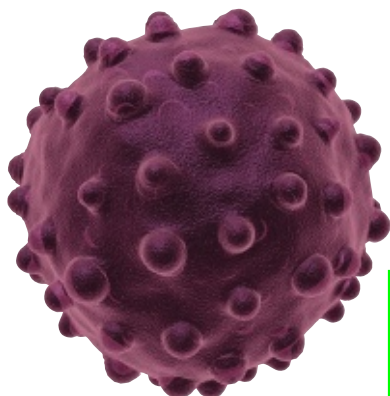
En bref

QUASARS : UN FLUX RECORD

Benoît Borquet, de l'Université de Virginie, et ses collègues ont étudié des quasars grâce au VLT (*Very Large Telescope*) de l'Observatoire austral européen (un quasar est constitué du disque d'accrétion entourant le trou noir supermassif au centre d'une galaxie et des jets de matière expulsée du disque). L'équipe a découvert que le quasar J1106+1939 éjecte en un an l'équivalent de 400 fois la masse du Soleil à une vitesse de 8 000 kilomètres par seconde, soit cinq fois le record précédemment observé.

LA COURBURE DES PLANTES

Comment les plantes restent-elles droites ? On pensait qu'elles minimisaient leur inclinaison par rapport à la gravité, mais une équipe franco-danoise a montré qu'elles réduisaient aussi leur courbure. Les chercheurs ont filmé le redressement des plantes après avoir plié leur tige et montré que les deux types d'action (sur la gravité et sur la courbure) étaient nécessaires pour l'expliquer. Un changement d'orientation du cytosquelette (qui guide les flux cellulaires) pourrait être impliqué.



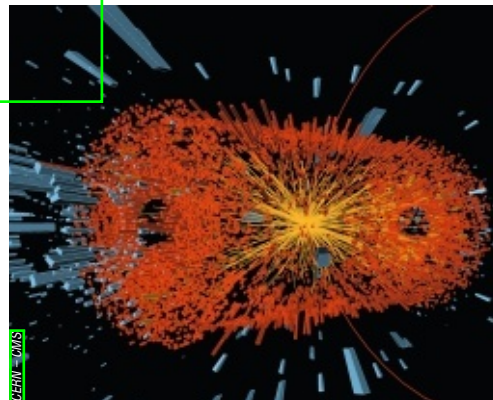
Le virus de l'hépatite C est un facteur déclenchant du carcinome hépatocellulaire, un cancer primitif du foie.

Physique

Prendre la température d'un plasma quarks-gluons

Au Grand collisionneur de hadrons du CERN, le LHC (*Large Hadron Collider*), les physiciens accélèrent des noyaux de plomb à des énergies très élevées. Lors de la collision frontale de deux noyaux, il se forme un état de la matière qui aurait existé dans l'Univers primordial : un plasma de quarks et de gluons. Il est difficile d'étudier les propriétés de ce plasma, car sa durée de vie est très courte, de l'ordre de 10^{-23} seconde. Pour en mesurer la température, les physiciens de l'expérience CMS (*Compact Muon Solenoid*) ont suggéré d'étudier l'abondance de certaines particules.

Les quarks sont des particules élémentaires dont il existe six versions, ou saveurs, notées u , d , c , s , t et b . À « basse » température, ils sont confinés en ensembles de trois quarks, nommés baryons, dont font partie les protons et les neutrons, ou en assemblages d'un quark et un antiquark, nommés mésons. L'interaction forte des quarks est assurée par l'échange de gluons. À haute température – au-delà de 2000 milliards de degrés –, les quarks et les gluons sont quasi libres de se déplacer et forment un plasma. Lors d'une collision de noyaux de plomb au LHC, on a d'abord la création de hadrons (mésons ou baryons) lourds, puis la formation du plasma. L'équipe de CMS s'est intéressée à un type de méson lourd, le méson Upsilon, noté $Y(1S)$, et ses états excités $Y(2S)$ et $Y(3S)$, qui sont constitués



Chaque méson Upsilon produit se désintègre en une paire de muons, enregistrés (en rouge) par le détecteur CMS.

d'un quark b et d'un antiquark $\bar{b}$. Dans le plasma, une partie de ces mésons se « dissolvent », surtout les états excités dont les quarks sont moins fortement liés. Or ce phénomène augmente avec la température. En comparant les quantités des différents types de mésons Upsilon présents dans le plasma, les physiciens estiment alors la température.

→ S. B.

Collaboration CMS, *Physical Review Letters*, vol. 109, 222301, 2012

Biologie moléculaire

De l'hépatite C au cancer

L'hépatite C est une maladie infectieuse due à un virus qui s'attaque au foie ; la maladie peut devenir chronique, voire évoluer en cirrhose et en cancer du foie. En France, près de 250 000 personnes souffrent d'hépatite C chronique et on enregistre plus de 2500 décès par an. Ce virus serait la principale cause d'apparition de cancer dans le foie. Martin Higgs et ses collègues, dans l'équipe de Jean-Michel Pawlotsky à l'Institut Mondor de recherche biomédicale à Créteil (INSERM U955), viennent de montrer par quels mécanismes. Ils espèrent ainsi développer de nouvelles cibles thérapeutiques.

Ces chercheurs ont développé un modèle de souris transgénique où les cellules hépatiques expriment toutes les protéines du virus de l'hépatite C humaine. Ils ont alors constaté différents phénomènes favorisant le développement des cancers : les cellules du foie surnuméraires ne sont plus éliminées, leur ADN n'est plus réparé correctement et elles produisent en excès des radicaux libres toxiques. Puis ils ont montré que ces anomalies sont liées à la surexpression d'un gène, *c-Myc*. En prélevant du tissu hépatique chez des patients infectés par le virus, ayant ou non un cancer du foie, les chercheurs ont confirmé que ce gène est surexprimé

dans toutes les cellules hépatiques, qu'elles soient ou non cancéreuses.

Ainsi, le virus de l'hépatite C entraîne une transcription accrue du gène *c-Myc*, via une cascade d'événements cellulaires (la protéine NS5A du virus active les protéines Akt des hépatocytes, ce qui stabilise un facteur de transcription qui, à son tour, favorise l'expression de *c-Myc*). Et la surexpression de *c-Myc* augmente la production de radicaux libres dans les hépatocytes et perturbe la réparation de leur ADN et leur division. Ces cellules hépatiques se transforment alors en cellules cancéreuses.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

Oncogene, en ligne le 29 octobre 2012

Entomologie

Bondir sur l'eau

Les insectes se déplaçant à la surface d'un lac ou à proximité, très exposés à des prédateurs, ont besoin d'une stratégie de fuite efficace. Des grillons de la famille des Tridactylidés ont des pattes arrière qui leur permettent de sauter sur l'eau. Leurs tibias contiennent de la résiline, une protéine très élastique, qui permet une forte détente des tibias et de sauter en 5,8 millisecondes. Mais cela ne suffit pas pour bondir depuis une surface liquide. Malcolm Burrows et Gregory Sutton, de l'Université de Cambridge en Grande-Bretagne, ont découvert que les pattes arrière de l'insecte sont couvertes d'épérons et d'éléments en forme de pagaies. Lors du saut, les pattes pénètrent dans l'eau et ces pagaies se déploient, multipliant la surface d'appui par un facteur 2,4. En poussant le liquide vers le bas, le grillon saute avec, en moyenne, une vitesse de 1,2 mètre par seconde, sur une hauteur atteignant dix centimètres et avec une portée de trois centimètres.

→ S. B.

M. Burrows et G. P. Sutton, *Current Biology*, vol. 22, R990, 2012

M. BURROWS ET G. P. SUTTON

Neurosciences

La conscience a ses pivots

La conscience serait un état d'éveil et de perception qui nécessite la circulation des informations dans un vaste réseau de connexions où des « lignes » se connectent en certains « nœuds pivots ». Sophie Achard et ses collègues, du CNRS, de l'INSERM à Grenoble, de l'Université de Cambridge et du CHU de Strasbourg, ont montré que ces pivots cérébraux sont essentiels à la conscience, et que la perte de celle-ci est liée à leur réorganisation.

Quand les connexions du réseau sont perturbées, il y a perte de conscience, comme dans certaines formes de coma. Et ces états altérés de conscience présenteraient un syndrome de déconnexion cérébrale. En fait, le réseau n'est pas déconnecté, mais reconfiguré, selon S. Achard et ses collègues. Les neurobiologistes ont comparé l'activité cérébrale au repos de 17 patients dans le coma et de 20 volontaires sains, et ont montré que les réseaux cérébraux dans les deux groupes sont similaires et fonctionnent normalement. En revanche, les pivots corticaux des personnes conscientes ne correspondent pas à ceux mis en évidence chez les patients dans le coma et *vice versa*.

→ B. S.-L.

S. Achard et al., *PNAS*, en ligne le 26 novembre 2012

Neurobiologie

Parkinson : une protéine dysfonctionnelle en cause

La maladie de Parkinson se manifeste par des troubles moteurs (ralentissement des mouvements, tremblements, rigidité), dus à la mort de certains neurones. Au cours de sa progression, une forme anormale d'une protéine, l'alpha-synucléine, s'agrège dans ces neurones. Mais est-ce la cause ou la conséquence de la maladie ? Kelvin Luk, de l'Université de Pennsylvanie, aux États-Unis, et ses collègues ont montré chez la souris qu'une injection de protéines alpha-synucléines dysfonctionnelles suffit pour tuer les neurones et causer les symptômes.

La maladie de Parkinson touche notamment une aire cérébrale nommée *substantia nigra pars compacta*. Les neurones de cette aire synthétisent de la dopamine, un neurotransmetteur (messager chimique libéré dans une synapse et qui assure la communication entre neurones) essentiel aux mouvements. On estime que les troubles moteurs apparaissent lorsque 70 pour cent de ces neurones sont détruits.

Or l'alpha-synucléine est impliquée dans la libération de dopamine, notamment parce qu'elle interagit avec diverses protéines participant à son transport et au franchissement de la mem-

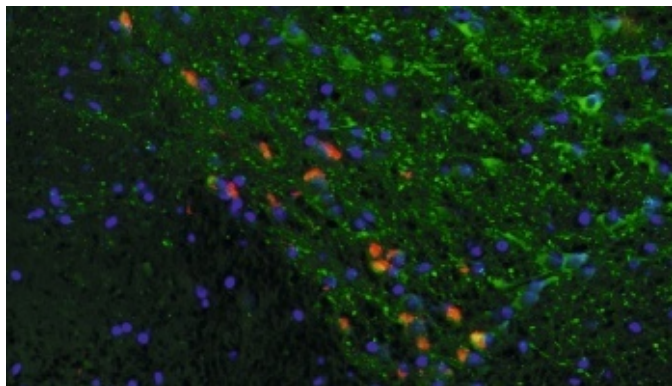
brane cellulaire. Des facteurs génétiques ou environnementaux peuvent causer un mauvais repliement de l'alpha-synucléine, qui ne fonctionne plus normalement. Elle s'accumule alors dans le neurone, formant des dépôts nommés corps ou neurites de Lewy.

K. Luk et ses collègues ont injecté des protéines alpha-synucléines défectueuses dans le cerveau de souris sauvages saines et constaté qu'elles se répandaient dans de nombreux neurones interconnectés. Les protéines défectueuses semblent avoir agi comme des « graines », autour desquelles s'accumulent des protéines saines pour former des corps de Lewy.

Au bout de six mois, plus d'un tiers des neurones producteurs de dopamine de la *substantia nigra pars compacta* étaient détruits. En outre, les souris obtenaient de moins bons résultats aux tests moteurs. Ces symptômes sont caractéristiques de la maladie de Parkinson, qui serait donc due à des protéines alpha-synucléines dysfonctionnelles. Un processus similaire pourrait être à l'œuvre dans d'autres maladies dégénératives, telle celle d'Alzheimer, aussi associée à des protéines défectueuses.

→ G. J.

Science, vol. 338, pp. 949-953, 2012



Trois mois après l'injection de protéines alpha-synucléines dysfonctionnelles à des souris, de nombreux neurones (en vert) d'une aire cérébrale nommée *substantia nigra pars compacta* sont envahis par des agrégats de ces protéines (en rouge).

K. LUK, UNIV. OF PENNSYLVANIA

Neurobiologie

Des chiens qui remarchent

La greffe de cellules nommées cellules gliales engainantes olfactives est une piste prometteuse pour la réparation de lésions de la moelle épinière. Ces cellules favorisent la croissance des axones des neurones olfactifs, situés dans les fosses nasales. On teste aujourd'hui sur des modèles animaux si leur greffe dans une moelle épinière endommagée peut participer au rétablissement de liaisons neuronales et avoir un effet thérapeutique. Par ce moyen, Nicolas Granger, de l'Université de Cambridge, et ses collègues ont fait recouvrer à des chiens blessés une certaine mobilité des pattes arrière. Toutefois, l'effet semble s'être concentré sur des neurones aux connexions localisées à l'intérieur de la moelle, qui assurent un comportement réflexe de coordination entre les membres antérieurs et postérieurs. Aucune amélioration des connexions avec le cerveau n'a été constatée. Il n'est donc pas prouvé que cette technique puisse aider à rétablir un contrôle cérébral des mouvements, lorsque celui-ci est perdu...

→ G. J.

N. Granger et al., *Brain*, vol. 135, pp. 3227-3237, 2012

Biologie végétale

OGM : l'étude Séralini rejetée

Publiée le 19 septembre dernier dans une revue internationale, l'étude de Gilles-Éric Séralini, de l'Université de Caen et membre du CRIIGEN (un comité de recherche indépendant), a déchaîné les passions en France. Réalisée sur des rats, elle affirmait démontrer la toxicité du maïs transgénique NK603 vendu par Monsanto et de l'herbicide Roundup auquel cet OGM est résistant (voir nos actualités de novembre 2012). Les passions et l'enjeu étaient tels, que plusieurs instances officielles ont dû se pencher sur ces travaux et se prononcer sur leur validité. Avec un verdict négatif : l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail), le HCB (Haut Conseil des biotechnologies), l'EFSA (Autorité européenne de sécurité des aliments) ont tous trois disqualifié l'étude Séralini (échantillon statistiquement trop petit, souche de rats inadaptée à des études sur deux ans...). Mais l'affaire aura au moins permis de souligner la nécessité, dans ce domaine sensible, de travaux indépendants, transparents et rigoureux – y compris du côté des industriels!

→ M. M.

www.criigen.org, www.anses.fr, www.hautconseilbiotechnologies.fr, www.efsa.europa.eu/fr/

Astronomie

Une planète errante proche ?

Une équipe franco-canadienne a détecté un objet qui pourrait être une planète errante se déplaçant librement dans l'espace, à une centaine d'années-lumière. Cependant, l'objet découvert appartiendrait au groupe de la Dorade, un ensemble d'une trentaine d'étoiles se dirigeant dans la même direction. Cette configuration unique permet d'étudier la supposée planète, nommée CFBDSIR2149.

Les planètes errantes sont difficiles à distinguer des naines brunes. Ces dernières sont des étoiles de masse trop faible pour amorcer des réactions thermonucléaires. En principe, les naines brunes se forment comme les étoiles, par effondrement gravitationnel d'un nuage moléculaire, tandis que les planètes naissent par effondrement local d'un disque de poussière présent autour d'une étoile. Une planète peut ensuite être éjectée du système stellaire et devenir une planète errante.

L'objet CFBDSIR2149 a été découvert au télescope Canada-France-Hawaii, puis, pour en étudier les caractéristiques, examiné au VLT (Very Large Telescope) de l'Observatoire austral européen au Chili. Son mouvement laisse supposer que CFBDSIR2149 appartient au groupe de la Dorade avec une probabilité supérieure à 80 pour cent. Philippe Delorme, de l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble, et ses collègues ont déduit sa masse de son mouvement dans le groupe : entre 4 et 7 fois celle de Jupiter. Ils ont aussi estimé son âge en supposant qu'il est comparable à celui de tous les autres objets du groupe, soit entre 50 et 120 millions d'années. L'étude de son spectre électromagnétique a permis d'évaluer sa température à environ 700 kelvins (427 °C). CFBDSIR2149 présente ainsi les caractéristiques d'une planète, mais il reste à déterminer comment elle s'est formée.

→ S. B.

Astronomy & Astrophysics, vol. 548, A26, 2012



Vue d'artiste de la planète CFBDSIR2149.

DERNIÈRE minute ...

UN ENTONNOIR À LUMIÈRE

La diffraction fait obstacle à la miniaturisation des dispositifs photoniques au-dessous de la longueur d'onde lumineuse utilisée. Hyuck Choo et ses collègues du Caltech ont créé une boîte couverte d'une couche d'or, où la lumière entre d'un côté et excite les électrons du métal ; les excitations transportent l'information et se propagent dans la boîte qui se rétrécit comme

un entonnoir, avant de se retransformer en un faisceau lumineux large de quelques nanomètres.

LE PLUS ANCIEN FROMAGE SERAIT POLONAIS

Le premier fromage aurait été fabriqué vers 8000 avant notre ère, mais on ignore si ce fut au Proche-Orient, en Europe ou en Asie centrale. Les plus anciens fragments de faisselles

poteries perforées pour la fabrication de fromage, viennent d'être découverts en Pologne et remontent au VI^e millénaire avant notre ère, ce qui place en Europe le plus ancien foyer – connu – de production fromagère.

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

En 2013 faites le plein de nouvelles expériences

...ABONNEZ-VOUS !

16 n^{os} • 76€

au lieu de 102,70€ (prix de vente au numéro)

+ 1 Dossier Pour la Science offert !



→ Le mensuel de référence



→ Le trimestriel thématique

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

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

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** (12 n^{os}/an) + **Dossier Pour la Science** (4 n^{os}/an)

☐ 1 an • 16 numéros • 76€ au lieu de 102,70€

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-Mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16€ – autres pays 35€.

☐ 2 ans • 32 numéros • 143€ au lieu de 205,40€

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-Mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 34€ – autres pays 72€.

+ En cadeau, je choisis 2 numéros des Dossiers Pour la Science parmi les titres suivants :



☐ N° 61 - 077661
Oct.-Déc. 2008



☐ N° 62 - 077662
Janv.-Mars 2009



☐ N° 63 - 077663
Avril-Juin 2009



☐ N° 64 - 077664
Juill.-Sept. 2009



☐ N° 66 - 077666
Janv.-Mars 2010



☐ N° 67 - 077667
Avril-Juin 2010



☐ N° 68 - 077668
Juill.-Sept. 2010



☐ N° 69 - 077669
Oct.-Déc. 2010

Retrouvez tous les numéros parus sur www.pourlascience.fr

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. (facultatif) : _____

Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____

Signature obligatoire _____

Mon e-mail pour recevoir la newsletter Pour la Science et bénéficier des versions numériques de mes magazines* (à remplir en majuscule).

_____ @ _____

* en créant mon compte sur www.pourlascience.fr

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

POINT DE VUE

Évaluation de la science : n'ayons pas peur de l'élection !

L'évaluation des chercheurs et structures de recherche n'est efficace et juste que lorsque les experts qui la font sont élus par leurs pairs.

Philippe BUTTGEN

Les Assises de l'enseignement supérieur et de la recherche organisées par le gouvernement français se sont conclues en novembre 2012 sur plusieurs constats de perplexité. Le principal concerne l'évaluation des chercheurs, laboratoires et organismes de recherche. La question est vivement discutée depuis plusieurs années. La création en 2006 d'une Agence d'évaluation de l'enseignement supérieur et de la recherche (AERES), ses débuts chaotiques, sa passion normative, ont polarisé les débats, échauffé les esprits ; tout cela a pu égarer.

Soyons précis. La question posée aujourd'hui est celle des conditions d'une évaluation utile aux scientifiques et à la société.

Parmi ces conditions, la plus fréquemment mentionnée est celle de l'indépendance des évaluateurs. Elle est indispensable lorsqu'il s'agit d'évaluer les activités et les productions d'un chercheur ou d'un laboratoire. Mais que signifie-t-elle ?

Je plaiderai pour une idée simple : l'évaluation de la science n'est indépendante qu'à condition d'être exercée par des experts majoritairement élus par les chercheurs. La règle vaut en tous domaines, évaluation des chercheurs, des publications, des laboratoires, des projets de recherche.

Où en sommes-nous aujourd'hui ? La notation des laboratoires (comme à l'école : A+, A, B...) se meurt ; la bibliométrie, qui évalue en fonction de la quantité de publications, du classement des revues où elles sont parues et du nombre de leurs citations, plie

sous les scandales qu'elle crée ; la course à l'« excellence » des laboratoires et des projets de recherche est un mirage qui se dissipe. C'est une bonne chose. Nous la devons à la mobilisation des chercheurs en 2009, ainsi qu'au spectacle des dégâts qu'ont pu produire, dans d'autres domaines, d'autres agences dites elles aussi de « notation ».

De toutes ces crises, le lien entre science et évaluation de la science sort toutefois renforcé. On a compris qu'« évaluation », ici, signifie autre chose qu'une prise de position sur la valeur de la science ; autre chose aussi

**SEULE L'ÉLECTION DOTE L'EXPERT
d'une vraie légitimité et lui confère
une confiance durable en son propre jugement.**

qu'une mesure pseudo-objective, et jamais juste, des « performances » d'un chercheur ou d'un laboratoire. De quoi s'agit-il alors ? Tout simplement des pouvoirs de la réflexion. La science s'évalue, car elle est par elle-même retour sur soi, discussion d'elle-même. Elle n'avance qu'en se regardant avancer. Notre devoir d'évaluateurs est de définir les procédures les plus propices à cet exercice de la réflexion. L'indépendance de l'expert commence ici : dans la recherche des conditions qui promeuvent la liberté du jugement.

En matière d'évaluation, la première condition de cette liberté est la légitimité. L'AERES a été créée, et fonctionne toujours, comme une cascade d'experts nommés. C'est son péché originel. On descend degré par degré du président de l'Agence, nommé par décret, à l'expert de base, nommé par

un expert intermédiaire lui-même nommé. On a tenté de rassurer la communauté scientifique en expliquant que ces experts nommés sont eux-mêmes des savants, des collègues, des « pairs ». C'est la moindre des choses ! À qui imaginerait-on sinon de confier l'évaluation de la science ?

Il faut ici faire une distinction. La légitimité scientifique des experts nommés n'est pas en cause : ce sont des chercheurs. Elle ne se confond cependant pas avec leur légitimité comme experts habilités à évaluer. Il est probable qu'un mauvais chercheur fera un mauvais expert. Mais cela n'implique pas qu'un bon chercheur fasse un bon expert. Que faut-il de plus ?

C'est la deuxième condition de l'indépendance : la reconnaissance accordée aux experts. Sur quoi repose-t-elle ? Sur leur réputation ? C'est une chose bien mystérieuse. Sur leurs « performances », mesurées par la bibliométrie et autres « critères » ? Outre qu'elles sont contestées, elles enferment l'évaluation dans un cercle vicieux : un expert désigné sur de tels critères n'aura de légitimité auprès de ceux qui l'ont nommé qu'en appliquant ces critères à ceux qu'il évalue. C'est ce cercle qu'il faut briser : le cercle du conformisme en science et de la soumission aux pouvoirs.

Que reste-t-il alors ? Une chose simple et exigeante comme la démocratie : l'élection. Elle existe et est approuvée depuis des décennies dans la recherche (le Comité national de la recherche scientifique évalue chercheurs et laboratoires du CNRS) et dans l'université (le Conseil national des universités valide les

candidatures des enseignants-chercheurs et suit leur carrière]. Seule l'élection dote l'expert d'une vraie légitimité et lui confère une confiance durable en son propre jugement. De l'élection, quand elle a été correctement organisée, personne ne doute ; les « référentiels », « critères » et autres « indicateurs de performance » favorisés par nos nouvelles agences sont d'une certitude bien moindre. Et les modifier, les affiner ou les simplifier n'y changera rien.

La troisième condition de l'indépendance, après la liberté et la reconnaissance, vient d'être désignée : c'est la confiance. La confiance de l'expert en son propre jugement se nourrit de celle que ses collègues lui témoignent. L'expérience des dernières années a montré à quel point la confiance diffère de la « transparence » qu'on a tant

vantée. Qu'importe que des « critères » ou une « grille » d'évaluation soient « transparents » et connus de tous, s'ils sont mauvais ? Mieux vaut des experts choisis par une majorité, et choisis pour avancer à la seule force de leur réflexion.

On se méfie aujourd'hui de l'élection. D'aucuns lui reprochent ses « biais politiques » : ce fut le cas aux Assises encore. C'est peut-être un travers de la science en France. Le « modèle allemand » si souvent invoqué ignore ces dilemmes. La *Deutsche Forschungsgemeinschaft*, principal organe financeur de la recherche allemande, ne passe pas pour un repaire d'idéologues. Ses collègues disciplinaires sont pourtant élus par l'ensemble des chercheurs.

L'élection est une chose exigeante. A peine a-t-elle eu lieu que l'expert doit penser

à ses devoirs : ils sont nombreux, rigoureux, toujours à repenser. La suite des Assises devra y veiller : ce sera un bon moyen de sortir par le haut des conflits de structures. Une chose est sûre cependant : la refondation d'un système d'évaluation efficace dépendra de la confiance que nous mettrons dans le principe électif. ■

Philippe BUTTGEN est professeur de philosophie à l'Université Paris I – Panthéon-Sorbonne. Depuis octobre 2012, il préside la Conférence des présidents du Comité national de la recherche scientifique (CPCN), qui coordonne 900 experts élus et nommés, universitaires et chercheurs, chargés d'évaluer chercheurs et laboratoires du CNRS.



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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

La progressivité des prix de l'énergie sera-t-elle efficace ?

Les bienfaits sur la consommation d'une « tarification progressive » de l'énergie en fonction du volume de consommation ne sont pas prouvés.

Boris Solier

La proposition de loi dite de « transition vers un système énergétique sobre » vise à inciter les ménages à réduire leur consommation énergétique, en introduisant davantage de progressivité dans les tarifs du gaz et de l'électricité. Adoptée à l'Assemblée nationale début octobre 2012, elle a par la suite été rejetée par le Sénat et n'a pas encore été réexaminée. Elle consiste à superposer aux tarifs de l'énergie existants un système de bonus-malus applicable par tranches de consommation. La première tranche, ou volume de base, représente les besoins énergétiques « essentiels ».

L'énergie consommée dans cette tranche bénéficie d'un bonus déduit de la facture, l'objectif étant de faciliter l'accès à un volume de consommation minimum. Deux autres tranches représentent des demandes « de confort » et sont pénalisées d'un malus fonction de la surconsommation. Concrètement, la facture d'un ménage type devrait diminuer d'environ 20 pour cent si la consommation se limite au volume de base, et augmenter de 10 pour cent si elle en représente le double.

Le volume de base sera calculé pour chaque ménage (en fonction de la zone climatique, du nombre de personnes ratta-

chées au foyer fiscal et du mode de chauffage) à partir d'un volume dit de référence, qui sera fixé au niveau national par un décret du Conseil d'État. L'efficacité du dispositif à déclencher des réductions de consommation dépendra avant tout du volume de référence, ainsi que des montants de bonus-malus.

Elle dépendra ensuite de la façon dont les consommateurs réagiront aux variations de prix : on parle d'élasticité-prix de la demande. L'élasticité varie selon les usages énergétiques, certains étant particulièrement difficiles à réduire (éclairage, électroménagers...). Elle est globalement faible à court terme, c'est-à-dire que les



→ www.pourlascience.fr/emplois

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

POUR LA
SCIENCE

en partenariat avec
naturejobs



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

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

■ Une équipe Naturejobs
spécialisée, **au service des**
recruteurs francophones.
Contact : Muriel Lestringlez
E-mail : m.lestringlez@nature.com
Tél. : +44 20 7843 4994

POUR LA
SCIENCE **.fr**

Le site de référence
de l'actualité scientifique

usagers adaptent peu leur consommation aux variations de prix.

En dehors de la Californie, du Japon et de l'Italie, le recours à une tarification progressive demeure marginal parmi les pays développés. Le système proposé en France diffère de ceux mis en place ailleurs, car il repose sur des bonus-malus et non sur un prix qui varie directement avec les quantités consommées. Cependant, on peut tirer des enseignements de ces expériences internationales. La Californie a été pionnière dans la mise en place de tarifs progressifs pour l'électricité, qui comprennent aujourd'hui cinq tranches de consommation. Une évaluation empirique portant sur la période 1999-2008

a montré que les Californiens ont peu réagi aux différents niveaux de prix, et ont davantage perçu un prix moyen de l'électricité. Comparé à un prix uniforme, les tarifs progressifs tendent à augmenter la consommation, puisque le prix moyen est alors plus faible pour les premières tranches de consommation. Un système de tarifs progressifs ne sera donc efficace que si les consommateurs intègrent parfaitement les prix correspondant aux différents seuils de consommation.

Le second objectif poursuivi par le dispositif est la lutte contre la précarité énergétique, les malus prélevés sur les tranches de consommations supérieures devant financer les bonus de la première tranche. L'hypothèse sous-jacente est que la consommation augmente avec les revenus des ménages. Toutefois, ce n'est pas toujours vérifié : les ménages modestes ont parfois plus de mal à occuper un logement bien isolé ou à acheter des équipements économes en énergie, souvent plus chers. Le système de bonus-malus produit dans ce cas un effet contraire à celui recherché. La proposition de loi prévoit alors de doubler les bonus et de réduire les malus pour les consommateurs à faibles revenus. Cependant, il serait plus efficace d'aider financièrement les ménages les plus vulnérables à mieux isoler leur logement, en complément des tarifs de première nécessité.

De façon générale, le dispositif entraîne des coûts de gestion importants. L'admini-

nistration fiscale devra tout d'abord récolter les informations nécessaires au calcul du volume de base de chaque ménage. Il faudra ensuite garantir la neutralité comptable du dispositif pour les fournisseurs d'énergie et donc mettre en place un fonds de compensation, pour s'assurer que les malus compensent exactement les bonus.

Enfin, le système proposé risque de fragiliser l'équilibre du secteur électrique. Alors qu'une tarification optimale devrait refléter les contraintes pesant sur l'appareil de production aux différentes périodes, la progressivité des tarifs conduit à encourager la consommation lorsque cet appareil est déjà le plus sollicité, c'est-à-dire en

EN CALIFORNIE, LES CONSOMMATEURS
ont peu réagi aux différents niveaux
de prix, et ont davantage perçu un prix
moyen de l'électricité.

période de pointe, et à la réduire lorsque les équipements sont sous-utilisés. En effet, les personnes qui consomment peu d'électricité le font en général en période de pointe. Le déséquilibre est aussi économique, puisque les moyens de production utilisés en période de pointe (tels que les centrales à gaz ou au pétrole) sont plus coûteux. Il est environnemental enfin, ces moyens de production émettant plus de dioxyde de carbone.

Réduire la consommation énergétique de nos sociétés s'impose comme une priorité, afin de préserver la sécurité énergétique et la stabilité du climat. Il faudra également assurer un accès aux besoins énergétiques essentiels à un nombre croissant de personnes en situation de précarité. La progressivité des prix de l'énergie est alors une idée intéressante, mais ses impacts sur la consommation sont incertains. Par ailleurs, à vouloir atteindre trop d'objectifs – parfois contradictoires – via le seul prix de l'énergie, on risque de brouiller le signal envoyé aux consommateurs. En définitive, le remède pourrait se révéler pire que le mal. ■

*Boris SOLIER est chercheur
à la chaire Économie du climat
de l'Université Paris-Dauphine.*

VRAI OU FAUX

Les plantes communiquent-elles ?

Oui. Elles échangent divers signaux, par exemple chimiques, signalant ainsi leur présence ou celle d'un danger à leurs voisines.

Catherine Lenne, Olivier Bodeau et Bruno Moulia



La communication se caractérise par la transmission d'un signal à un récepteur, qui le perçoit, le décode et réagit en conséquence. Ce peut être un dialogue si le récepteur répond au message par un autre signal. Les recherches récentes étendent aux plantes ces notions, autrefois réservées aux animaux.

Les plantes ont des capacités de perception comparables à celles des animaux, mais diffusées (à l'instar du toucher animal), et non exercées par des organes localisés (oreilles, yeux...). En effet, elles portent des cellules sensibles à la lumière (via des pigments photosensibles), à des molécules dissoutes ou gazeuses, à la pression et au son. Ces cellules leur permettent de capter des signaux variés.

Les informations échangées par les plantes sont de divers types. Le premier est constitué de signaux de présence et de voisinage. Ces signaux peuvent être visuels : les pigments photosensibles réagissent différemment selon la nature des entités environnantes (les plantes et les rochers ne réfléchissent pas les mêmes longueurs d'onde lumineuses). En conséquence, les plantes se « regardent » et poussent en groupes homogènes ; chacune bénéficie ainsi d'un bon accès à la lumière sans trop s'exposer au vent et aux prédateurs. Si l'on rend les plantes « aveugles » par mutation des gènes codant les pigments photosensibles, les hauteurs de leurs tiges deviennent hétérogènes en peuplement dense.

En 2012, on a montré qu'une plante nommée arabette des dames perçoit les contacts prolongés de ses feuilles avec celles de ses voisines. Ce signal « tactile » enclenche des réactions en cascade : redressement des feuilles, d'où une modification du signal lumineux réfléchi, qui provoque l'arrêt de la croissance foliaire des voisines, limitant ainsi les risques de se faire de l'ombre.

Les plantes s'échangent également des signaux de voisinage « gustatifs », via leurs racines, qui libèrent diverses substances dans le sol. En réponse, elles émettent parfois des substances toxiques pour leurs congénères, lors d'une compétition interspécifique pour l'accès aux ressources.

Des signaux de stress et d'alarme

Les plantes échangent aussi des signaux de stress et d'alarme. Quand elles sont agressées, elles émettent une petite molécule gazeuse, l'éthylène. Cette molécule est transportée par les vents et captée par les plantes situées aux alentours. Alertées du sort de leurs voisines, elles développent des défenses similaires. Ainsi, lorsqu'une antilope dévore les feuilles d'un acacia, tous les arbres environnants de cette espèce se mettent à sécréter une substance toxique pour l'animal. De même, quand on fléchit une plante, on déclenche l'arrêt de la croissance en hauteur et le renforcement de la tige chez elle, mais

aussi chez sa voisine non fléchie ; l'ennemi commun serait alors le vent.

Quant aux signaux acoustiques, des travaux publiés en 2012 semblent indiquer que les racines de maïs émettent et captent des claquements sonores. Mais il reste à confirmer l'existence de ces signaux, à clarifier leur rôle et à préciser les récepteurs impliqués.

Les signaux peuvent être destinés à d'autres règnes du vivant. Lorsqu'un plant de tabac est attaqué par une chenille, il produit des composés volatils de type terpénoïdes ou méthyle-jasmonate. Cette « odeur d'appel au secours » attire une guêpe parasitoïde de la chenille. Parfois, un dialogue s'instaure, comme entre les Fabacées (haricot, soja...) et des bactéries du sol du genre *Rhizobium* : les racines et les bactéries s'échangent divers composés chimiques pour se reconnaître et établir une symbiose.

Ainsi, les plantes communiquent par une multitude de signaux. Dans de nombreux cas, la zone de perception du signal est séparée de la zone concernée par la réponse. Le transfert d'informations se ferait par certaines nervures de la plante, le long desquelles se propageraient des signaux électriques. Faut-il y voir des analogues des potentiels d'action véhiculés par les neurones chez les animaux ? La question est controversée... ■

Catherine LENNE et Bruno MOULIA sont chercheurs à l'Université Blaise Pascal et à l'INRA de Clermont-Ferrand. Olivier BODEAU est épistémologue à l'Université Paris 1.

QUESTIONS OUVERTES

Peut-on parler d'addiction au sucre ?

La consommation de sucre serait responsable de comportements pathologiques qui s'apparentent à une addiction. Toutefois, rien ne permet aujourd'hui de les détecter.

Serge Ahmed

L'addiction est, avec la dépression, l'un des termes du vocabulaire psychiatrique les plus détournés de leur acception médicale dans les sociétés industrialisées. Tout comportement dirigé par la recherche du plaisir, pour peu qu'il présente un risque, peut être taxé d'addiction. Rien ne semble y échapper. Ni la consommation de sucre, ni le sexe, ni les jeux de hasard, Internet, le sport, ni même le travail... On parle d'addictions comportementales, car ces comportements n'impliquent pas la consommation d'une drogue. La drogue est définie comme une molécule exogène, d'origine naturelle ou synthétique, capable de donner du plaisir en agissant directement sur les circuits neuronaux de la récompense, un ensemble d'aires cérébrales dont la stimulation renforce le comportement associé. Mais qu'est-ce qu'une addiction ? La question est d'autant plus d'actualité que les critères du diagnostic de l'addiction viennent d'être précisés, dans le cadre de la prochaine révision de l'ouvrage de référence sur les troubles mentaux, le *Manuel statistique et diagnostique des troubles mentaux* (DSM) publié par l'Association américaine de psychiatrie, dont la nouvelle édition, le DSM-V, paraîtra en mai 2013.

Le concept d'addiction a été défini pour distinguer, parmi les usagers d'alcool ou de drogues (opium, morphine, etc.), les consommateurs pathologiques incapables de contrôler leur consommation, malgré ses conséquences comportementales, sociales et médicales néga-

tives. L'application récente de ce concept aux comportements à risque qui n'impliquent pas la consommation de drogues n'est pas sans soulever des difficultés. Nous allons le voir dans le cas de la consommation régulière de boissons sucrées. Chez certains individus, elle serait causée par une addiction au sucre raffiné ajouté. Comment détecter ce comportement pathologique parmi les consommations normales ?

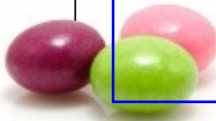
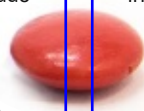
Une consommation encouragée

La consommation régulière de boissons sucrées inquiète les professionnels de santé, surtout chez les enfants et les jeunes adolescents, car elle augmente le risque de devenir obèse et de souffrir des complications médicales associées (diabète, accident vasculaire cérébral). Toutefois, contrairement au plaisir procuré par la consommation de drogues, celui lié à la consommation de boissons sucrées est provoqué par une activation sensorielle naturelle – principalement gustative – des circuits neuronaux de la récompense. Les drogues agissent directement sur les circuits neuronaux de la récompense, sans aucune médiation sensorielle : la drogue passe dans le sang et agit sur les neurones. Le sucre, en revanche, stimule d'abord les cellules réceptrices du goût sucré dans la bouche. Ces cellules stimulent à leur tour une cascade de neurones qui, finalement, agit sur les neurones de la récompense. De plus, contrairement aux drogues ou à l'alcool, les

boissons sucrées riches en sucre raffiné ajouté ne semblent altérer ni le jugement, ni la capacité de choix, ni la conduite des consommateurs. En outre, bien que le sucre raffiné ajouté dans ces boissons ne soit pas indispensable à la survie ou à la croissance (l'individu consomme par ailleurs, *via* son alimentation, les sucres dont il a besoin), il peut avoir une utilité biologique (répondre à une carence ponctuelle, par exemple), ce qui n'est pas le cas des drogues, même si certaines ont d'autres utilités (sociale, psychologique).

Enfin, contrairement à la consommation de drogues, celle de boissons sucrées est un comportement ubiquitaire dans les sociétés industrialisées. Hormis quelques messages de prévention, il existe peu d'incitations fortes à l'abstinence ou à la modération pour les boissons sucrées. La perspective lointaine de devenir obèse un jour pèse peu dans la balance par rapport au plaisir immédiat procuré par la consommation de boissons sucrées. Dans ce contexte sociétal, où cette consommation est encouragée par les producteurs, *via* des publicités souvent efficaces, il n'existe pas de distinction entre le consommateur moyen et le consommateur pathologique, susceptible d'avoir une addiction au sucre. La même incertitude existe pour la plupart des autres addictions comportementales. Où tracer la ligne de démarcation entre consommations normale et pathologique ? Sur quels critères ?

Des critères biologiques devraient permettre de trancher cette question. Cependant, malgré de nombreuses années de recherche,



on ne dispose pas encore d'indicateurs biologiques fiables de l'addiction, même dans le cas des addictions aux drogues. Les psychiatres ou les addictologues sont loin de pouvoir utiliser l'imagerie médicale ou les tests génétiques pour établir ou confirmer un diagnostic individuel d'addiction. Cela ne signifie pas que les personnes souffrant d'une addiction ne présentent aucune différence neurobiologique ou génétique. Bien au contraire. De nombreuses différences existent à toutes les échelles d'organisation neuronale du cerveau (neurotransmetteurs, synapses, neurones, régions cérébrales et circuits). Toutefois, ces différences ne sont pas propres à l'addiction.

Elles peuvent représenter des adaptations secondaires non spécifiques à l'addiction ou aux conditions de vie associées. Le cerveau est un organe plastique où les différentes structures s'adaptent rapidement à leur usage. Par exemple, si les conditions de vie incitent l'usager de drogues à se soucier plus du présent que du futur et donc si les fonctions d'anticipation à long terme sont sous-activées, le volume des aires corticales sous-tendant ces fonctions diminuera. De plus, ces différences ne sont pas assez discriminantes, ce qui limite encore leur utilisation pour un diagnostic médical individuel – un argument qui s'applique aussi aux différences génétiques.

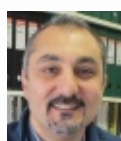
En l'absence de critères biologiques, les psychiatres ont recours à des critères comportementaux pour le diagnostic de l'addiction. Les critères les plus utilisés aujourd'hui sont ceux définis dans le *Manuel statistique et diagnostique des troubles mentaux*. Ces critères sont définis principalement d'après les informations fournies par les patients eux-mêmes. Imparfaits, ils sont révisés et précisés environ tous les dix ans. Dans la nouvelle révision de 2013, à laquelle ont participé des psychiatres du monde entier, l'addiction est définie comme un désordre de l'usage de drogues entraînant une souffrance ou un handicap cliniquement significatif (c'est-à-dire d'une intensité telle qu'il requiert une aide médicale). Le simple usage répété d'une drogue, même s'il peut conduire à terme

à une addiction, n'est pas considéré comme un désordre comportemental.

Ce désordre est défini par la présence pendant au moins un an d'au moins 2 critères parmi 11 possibles, la gravité du désordre comportemental augmentant avec le nombre de critères positifs (voir l'encadré page 21).

Contrairement à l'usage non médical du concept d'addiction, les psychiatres en charge de la révision des critères d'addiction ont décidé de ne pas étendre le diagnostic de l'addiction à toutes les addictions comportementales, à l'exception du jeu pathologique. Ce choix s'explique sans doute par leur volonté de ne pas banaliser le diagnostic de l'addiction en l'absence d'éléments de preuve suffisants. Pour mieux comprendre cette décision, analysons la signification des critères de l'addiction. Nous allons voir que, dans le contexte sociétal actuel, il est impossible de diagnostiquer une éventuelle addiction au sucre en s'appuyant sur ces critères.

L'AUTEUR



Serge AHMED est directeur de recherche au CNRS (CNRS-UMR 5293) au sein

de l'Institut des maladies neurodégénératives, à l'Université de Bordeaux 2.

En chiffres

■ Un Français moyen consomme 25 kilogrammes de sucre raffiné par an.

■ Chez les adolescents, une cannette de boisson sucrée par jour suffit pour prendre un kilogramme en un an.

■ Un Français de 18 ans et plus sur sept est obèse selon l'étude ObEpi 2012.

L'importance du contexte sociétal

On distingue deux grandes catégories de critères. Les premiers décrivent le vécu subjectif et personnel de l'addiction. Ils incluent : le désir impérieux de consommer une drogue particulière (critère 1) ; le besoin d'augmenter les doses pour compenser la diminution ressentie des effets recherchés (2) ou pour éviter ou soulager le manque (3) ; le désir persistant de s'abstenir ou de réduire sa consommation (4) ; le sentiment que la consommation devient incontrôlable, car elle est plus importante que voulue (5) et car elle continue malgré la prise de conscience des problèmes causés (6). La coexistence du critère 4 avec les autres critères subjectifs de l'addiction permet de comprendre les conflits et la souffrance psychologiques qui assaillent la personne dépendante aux drogues. Elle désire s'abstenir, mais continue à désirer la drogue et à augmenter les doses malgré les conséquences délétères.

La seconde catégorie rassemble les critères objectifs, qui décrivent les conséquences psychosociales de l'addiction et sont donc en principe vérifiables grâce au témoignage

BIBLIOGRAPHIE

S. Ahmed, **Sucres, addiction et obésité**, *Obésité*, vol. 7, pp.3-9, 2012.

K. Kendler, **The dappled nature of causes of psychiatric illness : replacing the organic-functional/hardware-software dichotomy with empirically based pluralism**, *Molecular Psychiatry*, vol. 17, pp. 377-388, 2012.

P. Peretti-Watel et J.-P. Moati, **Le principe de prévention**, Seuil, 2009.

J.-P. Tassin, **Le jeu, une drogue comme les autres ?**, *Pour la Science*, n° 372, pp. 28-31, 2008.

A. Brandt, **The Cigarette Century**, Basic Books, 2007.

Le site de concertation autour de la révision du *Manuel statistique et diagnostique des troubles mentaux* : <http://www.dsm5.org>

de l'entourage. Ces critères incluent : beaucoup de temps consacré à rechercher, à se procurer une drogue ou à récupérer de ses effets (7); l'incapacité à remplir ses obligations professionnelles, familiales ou scolaires du fait de la consommation (8); l'abandon de toute autre activité à cause de la consommation de drogue (9); la persistance de la consommation malgré les problèmes sociaux ou personnels causés (10) et malgré les dangers encourus (11). Ces conséquences ne sont bien sûr pas toujours indépendantes les unes des autres. Par exemple, le critère 7 peut causer ou aggraver les critères 8 et 9, lesquels sont fortement liés.

En pratique, on constate que l'expression comportementale de la plupart de ces critères dépend du contexte sociétal dans lequel l'addiction survient : ils ne deviennent manifestes que dans un contexte restrictif, hostile et stigmatisant. Le désir de consommer de la drogue persiste malgré l'interdit, celui de s'abstenir s'intensifie, et la souffrance psychologique engendrée alors révèle à l'individu sa propre perte de contrôle. Ces conséquences psychosociales et la souffrance associée sont

bien réelles, mais elles dépendent beaucoup des valeurs et des normes sociales et légales en vigueur dans la société à un moment donné de son histoire.

Ce point est capital, car il montre que l'addiction peut demeurer invisible et muette dans certains contextes sociétaux et se révéler dans d'autres. Serait-ce le cas aujourd'hui pour l'addiction au sucre, voire pour les autres addictions comportementales ? C'est ce que suggère l'histoire récente du tabagisme, qui illustre comment une addiction peut apparaître au grand jour dans un certain contexte sociétal. Le tabagisme pathologique est un exemple d'autant plus intéressant qu'il est à la fois une addiction aux drogues (la nicotine) et une addiction comportementale (le rituel de la cigarette).

Comment l'addiction au tabac a été révélée

Jusqu'à la fin des années 1980, les cigarettes – comme les boissons sucrées aujourd'hui – étaient un bien de consommation courante recherché, valorisé et valorisant. Des millions d'hommes et de femmes de tout âge, de toute profession et de toute classe sociale fumaient quotidiennement des cigarettes. Les médecins et les psychiatres eux-mêmes étaient de gros fumeurs. À cette époque, la consommation de cigarettes provoquait peu ou pas d'effets comportementaux indésirables et peu de conséquences psychosociales négatives manifestes (à part peut-être quelques conflits entre fumeurs et non-fumeurs au travail ou au sein de la famille). De plus, hormis une escalade initiale de la consommation de cigarettes, les fumeurs ne présentaient aucun des autres critères, subjectifs ou objectifs, de l'addiction et surtout aucune souffrance cliniquement significative. De fait, le tabagisme n'était pas reconnu comme une addiction. Bien sûr, les fumeurs avaient déjà été informés et prévenus des dangers de la cigarette sur la santé, notamment du risque élevé de contracter un cancer du poumon. Mais ces dangers semblaient lointains, incertains et intangibles, les millions de fumeurs invétérés paraissant en parfaite santé.

Tout a basculé dans les années 1990 (en 1991 en France, avec la loi Evvin) après

Critères retenus pour le diagnostic de l'addiction

Dans la nouvelle version du *Manuel statistique et diagnostique des troubles mentaux* (DSM-V) à paraître en mai 2013, 11 critères ont été retenus pour le diagnostic de l'addiction :

- Un usage répété de la substance qui empêche de remplir les obligations au travail, à l'école ou dans la famille.
- Un usage répété de la substance dans des situations dangereuses.
- Une persistance de l'usage malgré les problèmes sociaux ou interpersonnels causés ou aggravés par les effets de la substance.
- Une tolérance définie soit par un besoin d'augmenter les doses de la substance pour atteindre les effets désirés, soit par une diminution des effets de la substance après usage répété de la même dose.
- Un sevrage pouvant se manifester soit par un syndrome de sevrage caractéristique de la substance, soit par un usage de la substance visant à soulager ou à éviter les symptômes du manque.
- La substance est souvent consommée au-delà des quantités voulues ou plus longtemps que prévu.
- Un désir persistant ou des tentatives ratées d'arrêter ou de contrôler l'usage de la substance.
- Beaucoup de temps consacré à se procurer ou à utiliser la substance, ou à récupérer de ses effets.
- L'abandon de toute autre activité à cause de l'usage de la substance.
- La persistance de l'usage de la substance malgré la prise de conscience d'avoir un problème physique ou psychologique causé ou aggravé probablement par la substance.
- Le désir impérieux d'utiliser une substance spécifique.

la reconnaissance générale des dangers du tabagisme passif chez les non-fumeurs et des effets pharmacologiques de la nicotine sur les circuits neuronaux de la récompense – effets souvent comparés par les scientifiques à ceux de la cocaïne ou de l'héroïne. Dès lors, le gouvernement ne pouvait plus s'accommoder de la liberté individuelle des fumeurs, considérés jusque-là comme libres de leur choix et inoffensifs. Il ne pouvait plus se contenter d'informer le public sur les dangers du tabagisme, en espérant que la rationalité des fumeurs, leur désir de rester en bonne santé et leur souci de ne pas nuire à autrui feraient le reste. S'en est suivi un ensemble de mesures restrictives visant à inciter les fumeurs existants à arrêter (ou à moins fumer) et les non-fumeurs à ne pas commencer, telles que l'interdiction de la publicité pour les cigarettes, l'imposition d'un âge minimum légal pour l'achat de tabac, l'augmentation du prix des cigarettes et l'interdiction de fumer dans de nombreux lieux publics. En France, l'État a cédé son monopole sur la production et la vente de cigarettes en 1995. Dans les pays anglosaxons, ces mesures ont été accompagnées d'une campagne antitabac musclée qui a entraîné une dégradation de l'image des fumeurs et des cigarettes. Les fumeurs ont été de plus en plus assimilés à des drogués et les cigarettes à de pseudo-seringues libérant dans le cerveau des doses de nicotine.

Dans ce nouveau contexte sociétal restrictif, hostile et stigmatisant où l'on ne pouvait plus nier ou dénier les dangers du tabagisme, nombre de fumeurs ont choisi, avec succès, de s'abstenir – pour la majorité sans aide médicale ou professionnelle. En revanche, d'autres ont continué à fumer, s'exposant aux conséquences psychosociales négatives créées par les nouvelles mesures restrictives et la stigmatisation. Avant ce basculement contextuel historique, rien ne permettait de distinguer ces deux grandes classes de fumeurs. Tout s'est passé comme si le changement de contexte sociétal, en poussant des millions de fumeurs à l'abstinence, avait exposé au grand jour une classe de fumeurs pathologiques bien réelle, mais

restée jusque-là invisible et muette. Est-ce à dire que la persistance d'un comportement de consommation dans un contexte sociétal restrictif, hostile et stigmatisant serait la marque tant recherchée distinguant l'addiction de la normalité ?

Ce n'est pas si simple. Il est vrai que l'abstinence volontaire exclut du diagnostic de l'addiction les fumeurs capables de s'arrêter de leur propre chef. Cependant, le statut pathologique des fumeurs persistants malgré un contexte sociétal restrictif, hostile et stigmatisant est plus ambigu. Parmi ces fumeurs résistants, tous n'ont pas nécessairement développé une compulsion pathologique et perdu le contrôle de leur consommation. Beaucoup continuent à fumer sans désir d'abstinence, sans regret ni souffrance. Certains parce qu'ils jugent avoir de bonnes raisons de continuer à fumer, même s'ils sont en désaccord avec le reste de la société. D'autres parce qu'ils ont peu d'alternatives accessibles pour obtenir de la satisfaction ou du plaisir. D'autres encore parce que la cigarette les aide à soulager une souffrance ou un handicap psychologique qu'ils ne savent pas soulager autrement. Or sans désir personnel d'abstinence ou de modération, pas de tentatives d'arrêt et sans

La persistance d'un comportement de consommation dans un contexte sociétal restrictif serait-elle la marque tant recherchée distinguant l'addiction de la normalité ?

tentative d'arrêt, pas d'incapacité d'arrêter, de conflit de motivation, de souffrance ni de demande d'aide.

Selon cette analyse, le désir persistant de s'abstenir et l'incapacité d'arrêter malgré un contexte sociétal restrictif, hostile et stigmatisant marquerait la ligne de démarcation entre comportements de consommation normal et pathologique. Seuls les consommateurs désirant l'abstinence, mais ne pouvant y parvenir sans aide professionnelle, souffriraient d'une addiction. Cela dit, l'absence du désir d'abstinence dans un contexte sociétal restrictif, hostile et stigmatisant ne garantit pas en soi l'absence d'une addiction. Il est en effet possible que certains consommateurs vivent

dans un environnement social « protégé » où la stigmatisation de leurs comportements et les conséquences psychosociales négatives associées ne seraient pas suffisamment prégnantes pour faire naître chez eux un désir d'abstinence. En d'autres termes, un désir d'abstinence couplé à une incapacité d'arrêter indiquent bien qu'il y a addiction, mais l'absence de ce désir n'atteste pas nécessairement l'absence d'addiction.

Doit-on restreindre l'accès au sucre ?

Ces nuances expliquent pourquoi l'extension du concept d'addiction à tous les comportements de consommation hédonistes reste délicate et doit se faire avec prudence. Ignorer ces nuances et négliger cette prudence reviendrait à bafouer les libertés individuelles, y compris celle de se nuire à soi-même en connaissance de cause et sans nuire aux autres. Dans les sociétés de consommation modernes, la ligne à ne pas franchir entre le normal et le pathologique se situe bien dans le désir personnel du consommateur de s'abstenir ou de limiter sa consommation. Nous avons vu avec l'exemple du tabagisme que la société peut se transformer radicalement pour provoquer et entretenir ce désir chez les consommateurs. Elle n'a toutefois pas le droit de contraindre les personnes résistantes, car leur résistance n'est pas nécessairement causée par une addiction, sauf bien

sûr si cette résistance nuit à autrui.

Dans le cas de la possible addiction au sucre, cela signifie qu'on ne pourra trancher la question qu'après basculement du contexte sociétal actuel, favorable à la consommation de sucre raffiné ajouté, vers un contexte sociétal restrictif, hostile et stigmatisant. Si dans ce nouveau contexte, certains consommateurs éprouvent le désir de s'abstenir ou de limiter leur consommation, mais sont dans l'incapacité d'y accéder sans aide, alors on pourra parler d'addiction au sucre. Le grand enjeu est de savoir si les éléments de preuve scientifique sur les dangers du sucre (épidémiologiques, expérimentaux, cliniques) sont suffisants pour justifier un tel basculement sociétal. ■

La mer Morte vivra-t-elle ?

Eitan Haddok

L'irrigation et l'extraction de minerais conduisent à l'assèchement de la mer Morte. Mais en s'associant, Israël, la Jordanie et l'Autorité palestinienne peuvent encore sauver cet exceptionnel lac salé.

L'ESSENTIEL

■ Le niveau de la mer Morte

est aujourd'hui de 426 mètres au-dessous de celui de la mer. Il diminue d'environ un mètre par an. La baisse est due au captage des eaux pour l'irrigation et à l'évaporation accélérée mise en place pour extraire des minéraux.

■ Des milliers de cavités, ou dolines, sont engendrées

par le retrait des eaux salées souterraines et l'effondrement du sol qui s'ensuit.

■ Un système de

canalisations construit sur 180 kilomètres pourrait acheminer de l'eau à partir de la mer Rouge. Des chercheurs testent l'impact qu'aurait le mélange des eaux sur la vie marine.

LA MER MORTE SE SITUE DÉSORMAIS à 426 mètres au-dessous du niveau de la mer, et ses eaux baissent d'un mètre par an. Par endroits, le rivage a reculé de plus d'un kilomètre. Plus de 3 000 dolines se sont formées sur le pourtour du lac. Depuis quelques années, ces cavités naissent au rythme d'environ une tous les deux jours. Certaines sont remplies d'eau salée, d'autres non.



La mer Morte est un lieu mystérieux. Point émergé le plus bas du globe, censé abriter les sites bibliques de Sodome et Gomorrhe, ses eaux et minéraux sont réputés pour leurs bienfaits. Et en dépit de son nom, ce lac salé constitue une source de vie microbienne remarquable. Mais on sait que son avenir est gravement menacé. Après des siècles de stabilité – due à un subtil équilibre entre l’approvisionnement en eau douce du Jourdain et une forte évaporation sous l’implacable soleil du Proche-Orient –, la mer Morte est en train de disparaître.

Les Jordaniens à l’Est, les Israéliens à l’Ouest, les Syriens et les Libanais au Nord, tous détournent massivement l’eau du fleuve avant même qu’elle n’ait atteint le lac salé. En pratiquant par évaporation l’extraction des précieux minéraux que recèle le lac, Israël et la Jordanie précipitent sa fin. Des milliers de cavités – les dolines – se forment sur les rivages, là où la mer s’est retirée, condamnant le tourisme et le développement économique sur son pourtour. Car qui peut prédire où le sol se dérobera ? Qui peut prendre le risque que soient engloutis des immeubles, des routes, des personnes ?

Conscients de voir périr sous leurs yeux un inestimable trésor naturel et culturel, Israéliens, Jordaniens et Palestiniens ont proposé l’installation d’un gigantesque système de canalisations qui alimenterait la mer Morte en eau provenant de la mer Rouge, au Sud.

Aujourd’hui, des scientifiques examinent la compatibilité des eaux et les conséquences que ce mélange aurait sur la chimie et la biologie de cette mer, qui pourrait se teinter de rouge si des algues y prolifèrent. Les représentants politiques tentent, eux, d’évaluer la réelle volonté de leurs nations d’assurer le financement de ce projet pharaonique estimé à dix milliards de dollars, auquel s’opposent les défenseurs de l’environnement. Quant aux États confrontés eux aussi à ce type de grandes étendues d’eau salée – la mer d’Aral, la mer Caspienne ou le Grand Lac salé aux États-Unis –, ils espèrent pouvoir en tirer des enseignements pour leur propre compte.

Sauf mention contraire, toutes les photographies sont de Jean Hédoche





EFFONDEMENTS À TOUT VA

Les dolines (1) peuvent mesurer jusqu'à 25 mètres de largeur et 15 mètres de profondeur. Elles peuvent apparaître d'un seul coup, engloutissant des randonneurs, des édifices ou des routes (3). Elles résulteraient du principe de dissolution : à mesure que l'eau salée souterraine se retire, de l'eau plus douce arrive, entre en contact avec la croûte salée qui s'est déposée et la dissout, provoquant l'effondrement de la surface.

Certaines dolines sont remplies d'eau salée, d'autres non. Parfois, elles se forment le long d'une ligne de faille superficielle (2) qui permet l'infiltration d'eau douce. La compréhension de ces phénomènes permettrait d'expliquer l'étrange apparition de dolines en Floride (États-Unis), au Guatemala, en Allemagne et en Espagne.

La mer Morte se vide d'abord parce que l'approvisionnement en eau du Jourdain est passé d'environ 1,3 milliard à 30 millions de mètres cubes par an. L'évaporation dépasse désormais l'apport en eau douce. Le lobe Sud de la mer Morte a complètement disparu. Cette déperdition d'eau fluviale est due au pompage effectué par Israël, la Jordanie, la Syrie et le Liban pour leurs besoins agricoles et domestiques. Certaines canalisations ne servent plus à rien, le Jourdain étant par endroits à sec (4).

L'AUTEUR

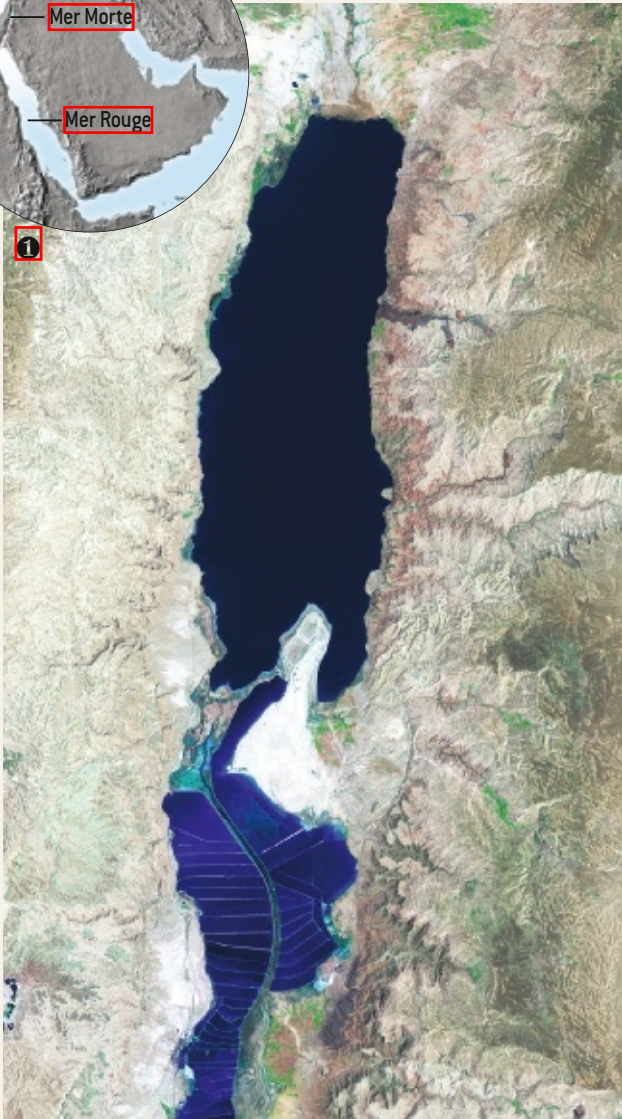
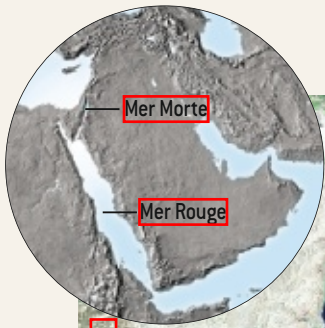


Eitan HADDOK est photographe et journaliste spécialisé en sciences de la Terre.

Il vit en région parisienne.

À ÉCOUTER

Jeudi 3 janvier 2013, Eitan Haddok reviendra sur la situation de la mer Morte dans la partie « Actualités » de l'émission **La marche des sciences**, sur France Culture de 14h à 15h. www.franceculture.com





UNE POSSIBLE RÉSURRECTION

Le niveau de la mer Morte baisse aussi parce que les Usines de la mer Morte, en Israël, et la Compagnie arabe de potasse, en Jordanie, détournent l'eau de la partie Nord du lac, au moyen d'un canal qui l'achemine vers le Sud. L'eau s'écoule alors dans de vastes bassins artificiels qui se déversent les uns dans les autres, dans l'ancienne partie Sud du grand lac (1, en bleu, et 2, en vue rapprochée). L'évaporation laisse des dépôts de minéraux concentrés et de sels tels que brome, magnésium et potasse (3), tous exploités par les entreprises d'extraction. En raison de la forte concentration en brome, l'air de cette région contient les concentrations d'oxyde de mercure (HgO) parmi les plus élevées de la planète (le brome et ses oxydes favorisent l'oxydation du mercure).

Si les conditions actuelles persistaient, le niveau de la mer Morte atteindrait – 550 mètres d'ici l'an 2200. Cette baisse pourrait être enrayée grâce à un projet de canalisations qui achemineraient de l'eau en provenance de la mer Rouge. Au long de ses 180 kilomètres, des usines de dessalement produiraient 900 millions de mètres cubes d'eau douce par an, dont la majeure partie rejoindrait le Jourdain. Il resterait 1,1 milliard de mètres cubes d'eau saumâtre, que l'on injecterait dans la mer Morte. Des centrales hydroélectriques pourraient au passage se servir de la dénivellation pour produire de l'électricité. Une étude de faisabilité, financée à hauteur de 17 millions de dollars par la Banque mondiale et réalisée par le bureau d'études français Coyne et Bellier de Suez, s'est achevée en 2011. Si ce projet voyait le jour, le niveau de la mer Morte pourrait être stabilisé à environ – 420 mètres d'ici l'an 2050.

Mais il n'est pas certain que l'eau obtenue après dessalement puisse se substituer à l'eau du Jourdain. Cette eau traitée et l'eau salée du lac pourraient ne pas se mélanger et former des couches. La prolifération d'algues et de bactéries est aussi un scénario envisageable, qui amènerait le lac, de couleur turquoise, à tirer sur le rouge. Des expérimentations réalisées par des microbiologistes et industriels dans de petits réservoirs semblent l'indiquer (4), mais les tests ne sont pas encore probants ou doivent être reproduits de façon indépendante.

Or sauver la mer Morte pourrait être bénéfique à bien des égards. Des biologistes ont récemment découvert une nouvelle forme de métabolisme dans certains micro-organismes présents dans l'eau. Des chercheurs ont aussi transplanté les gènes d'un champignon local sur une souche de levure qui, par la suite, a montré une forte résistance au stress salin, ainsi qu'à la chaleur et au stress oxydant. Ce gène permettrait peut-être de cultiver des sols dont la haute teneur en sel empêche actuellement toute activité agricole, et ainsi apporter la sécurité alimentaire à des millions de personnes vivant sur des terres salinisées, un peu partout dans le monde.

BIBLIOGRAPHIE

Pour le projet de canalisation mer Rouge-mer Morte : www.foeme.org et www.worldbank.org

S. Abu Ghazleh, A. M. Abed et S. Kempe, *The dramatic drop of the Dead Sea : background, rates, impacts and solutions*, dans *Macro-engineering Seawater in Unique Environments* (éds. : V. Badescu et R. B. Cathcart), pp. 77-105, Springer, 2011.

La mer Morte racontée

D. Ariztegui, M. Stein, Z. Ben-Avraham et N. Waldmann

Des carottes de sédiments longues de plusieurs centaines de mètres ont été récemment prélevées au fond de la mer Morte. Leur analyse, qui devrait préciser 200 000 ans d'évolution géologique et climatique du lac, a d'ores et déjà révélé quelques surprises.

La mer Morte, à la frontière entre Israël, la Jordanie et la Cisjordanie, est un site exceptionnel. Les eaux de ce lac de quelque 800 kilomètres carrés sont environ dix fois plus salées que celles des mers : 275 grammes de sel par litre, contre 20 à 40 grammes par litre dans les océans. La densité élevée de l'eau permet ainsi aux vacanciers de s'y baigner en flottant, tout en lisant un journal pour des photographies de souvenir. Par endroits, le lac est jonché de spectaculaires concrétions de sels ayant précipité (voir la figure 1).

Et cette région, flanquée de majestueuses montagnes désertiques, a marqué l'histoire des hommes : en témoignent le piton de Massada (Metsada en hébreu) où, en l'an 73, un millier de zélotes juifs ont résisté des mois au siège des Romains avant de se donner collectivement la mort, les célèbres « manuscrits de la mer Morte » découverts à partir de 1947, ou des épisodes bibliques tel celui de la femme de Loth changée en statue de sel.

Le grand lac salé subit depuis quelques décennies une baisse de niveau importante et

inquiétante, principalement due à la surexploitation des eaux du Jourdain qui l'alimente et à l'industrie de l'extraction de minerais. Son avenir est de ce fait menacé (voir *La mer Morte vivra-t-elle ?*, page 22). Mais à défaut d'avenir, la mer Morte a au moins un riche passé, qui va bien au-delà des périodes historiques.

Au cours des temps géologiques, cette pièce d'eau a connu plusieurs épisodes distincts, liés à une histoire climatique et tectonique agitée. Tout récemment, dans le cadre d'une campagne internationale de forage, de longues carottes de sédiments ont été prélevées dans le fond du lac afin de préciser l'histoire géologique de la mer Morte. Leur analyse n'est pas encore achevée. Mais, comme nous allons le voir, ces carottages ont déjà apporté des renseignements inédits sur les avatars du lac salé.

L'actuelle mer Morte se situe dans le bassin du même nom, à la plus basse altitude continentale de la planète (424 mètres sous le niveau de la mer en 2011), à la frontière entre le désert du Sahara et les zones climatiques

L'ESSENTIEL

■ La mer Morte est un site exceptionnel, dont le passé géologique et climatique est riche.

■ De longues carottes de sédiments ont été prélevées au fond de ce lac salé en 2010 et 2011.

■ Selon les premières analyses, le lac se serait asséché il y a 120 000 ans, et des traces d'activité microbienne subsistent jusqu'à 130 mètres sous le fond.

SOURCE : PROJET INTERNATIONAL DE FORAGES

par ses fonds

An aerial photograph of the Dead Sea, showing several large, irregularly shaped salt flats. The flats are light-colored, almost white, with concentric rings of varying shades of green and blue, indicating different mineral compositions and evaporation levels. The surrounding water is a deep, dark green color.

1. LA SALINITÉ DE LA MER MORTE
étant très élevée, la forte évaporation
fait précipiter des cristaux de sel.
Des structures parfois spectaculaires
se forment, comme ici dans la partie Sud,
très peu profonde, du lac.



2. CETTE VUE DU PROCHE-ORIENT, prise de la navette spatiale américaine *Discovery* le 16 juillet 2006, montre distinctement la mer Morte, avec sa partie méridionale qui ne subsiste qu'au travers des bassins artificiels destinés à l'extraction de minerais. La mer Morte est reliée au lac de Tibériade par la vallée du Jourdain. Les deux points rouges indiquent les sites de forage, où ont été prélevées des carottes de sédiments.



3. SUR LES POURTOURS DE LA MER MORTE, l'érosion est importante et les effondrements de terrain sont fréquents. En de nombreux endroits, les strates géologiques sont alors apparentes. On y observe parfois des structures spectaculaires, telles ces « séismites » créées par des tremblements de terre.

méditerranéennes. La superficie du lac a considérablement varié au cours des temps géologiques, avec une alternance de progressions durant les ères glaciaires et de régressions au cours des périodes interglaciaires (telles que l'Holocène actuel).

En fait, il y a plusieurs millions d'années, il ne s'agissait pas d'un lac, mais d'une lagune formée à la suite de la montée du niveau de la mer (voir l'encadré page ci-contre). Ce n'est qu'avec le retrait de la mer que cette lagune s'est fermée et a laissé place à un lac. Lors de la glaciation la plus récente, le lac, au maximum de son étendue, constituait le « lac Lisan » ; il remplissait le bassin de la mer Morte de son actuel site jusqu'au lac de Tibériade (ou mer de Galilée), au Nord de la vallée du Jourdain. Le lac Lisan succédait à des lacs plus vastes encore, le lac de Gomorrhe puis celui de Samra, correspondant aux périodes glaciaires précédentes.

Une histoire inscrite dans les sédiments

Les variations successives du niveau du lac ont entraîné des modifications de la composition chimique de ses eaux au fil du temps, notamment des modifications de la salinité. Cette histoire est inscrite et préservée dans les sédiments qui se sont déposés, lesquels représentent donc un moyen unique pour explorer l'expansion et la régression du désert et des zones climatiques de type méditerranéen, ainsi que les relations entre le climat des hautes latitudes et le climat tropical.

Mais les sédiments du bassin de la mer Morte racontent bien d'autres histoires. La formation du bassin résulte de l'activité de la faille du Levant, aussi appelée faille de la mer Morte, qui sépare la plaque arabe de la plaque africaine, la première se déplaçant vers le Nord et la seconde vers le Sud. Par conséquent, tout le bassin est situé dans une région tectonique active, souvent secouée par des séismes qui laissent leur empreinte dans les sédiments (voir la figure 3). L'identification des couches correspondantes et leur datation offrent aux scientifiques la possibilité d'établir une stratigraphie des séismes, ce qui permet notamment d'estimer leur fréquence.

Par ailleurs, le bassin de la mer Morte a été un lieu de passage des hommes préhistoriques lors de leur migration hors d'Afrique, et des groupes humains y ont vécu de l'époque paléolithique jusqu'à nos jours. Une reconstitution plus précise

de l'histoire climatique et tectonique de la région aiderait à démêler l'impact de ces changements sur le développement de ces cultures humaines et sur leurs migrations.

On comprend ainsi que les couches sédimentaires exposées sur le pourtour de la mer Morte, étudiées depuis plusieurs décennies, aient apporté aux scientifiques de précieuses informations relatives au paléoclimat, à la tectonique, à la paléosismologie, au paléomagnétisme et à l'histoire humaine.

Le grand intérêt des sédiments lacustres du bassin de la mer Morte en tant qu'archives environnementales est illustré par les sédiments du dernier lac glaciaire – le lac Lisan – exposés le long des rives de l'actuelle mer Morte (voir la figure 4). La formation du lac Lisan comporte jusqu'à une quarantaine de

LES AUTEURS

Daniel ARIZTEGUI est professeur au Département de géologie et de paléontologie de l'Université de Genève, en Suisse.

Mordechai STEIN est professeur à la Commission géologique d'Israël.

Zvi BEN-AVRAHAM est professeur au Département de géophysique et de sciences planétaires de l'Université de Tel-Aviv, et directeur fondateur de l'École L. H. Charney de sciences marines de l'Université de Haïfa, en Israël.

Nicolas WALDMANN est maître-assistant à l'École L. H. Charney de sciences marines de l'Université de Haïfa.

mètres de dépôts sédimentaires couvrant près de 60 000 ans (d'environ 75 000 à 17 700 ans avant notre ère). Les conditions qui régnaient lors de cette ère glaciaire y sont enregistrées avec une résolution temporelle atteignant quelques mois (une saison).

En effet, la formation du lac Lisan fait apparaître un dépôt périodique de couches d'épaisseur millimétrique où alternent du carbonate inorganique, qui précipitait au cours des saisons sèches sous l'effet de l'évaporation, et des matériaux détritiques, qui s'accumulaient lors des saisons humides, après avoir été entraînés des hautes terres voisines par l'érosion hydrique ou éolienne. La formation inclut également des couches clastiques associées aux tempêtes ou aux baisses de niveau du lac, des couches de

L'ÉVOLUTION DU BASSIN DE LA MER MORTE

Le bassin de la mer Morte est le plus grand et le plus profond des bassins de décrochement formés le long de la faille du Levant, ou même le long d'autres failles transformantes continentales. Au cours du Miocène, il y a environ 23 millions d'années, le bassin était rempli de dépôts fluvio-lacustres, constituant la « formation de Hatzeva ». Plus tard, durant le Pliocène, il y a environ 5 millions d'années, avec la montée

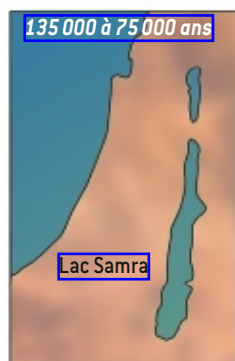
du niveau des océans, la mer Méditerranée a pénétré dans le bassin, formant la lagune de Sodome où se sont déposées d'épaisses couches successives de sel.

Lorsque la lagune s'est séparée de la mer en raison de la baisse du niveau de celle-ci, une étendue lacustre s'est formée et a occupé le bassin, à laquelle on a donné différents noms selon l'époque considérée : le lac de Gomorrhe du milieu

à la fin du Pléistocène (de plus de 740 000 à 135 000 ans), le lac de Samra de la dernière période interglaciaire (135 000 à 75 000 ans), le lac Lisan de la dernière glaciation (de 75 000 à 17 700 ans environ), et la mer Morte de l'Holocène actuel.

Alors que le lac Lisan de la dernière glaciation et la mer Morte de l'Holocène ont été largement étudiés au cours des dernières décennies, ce qui a apporté de riches infor-

mations sur les changements paléoenvironnementaux, on sait peu de choses de leurs prédécesseurs glaciaires et interglaciaires, qui ne sont exposés que de façon fragmentaire le long des rives de l'actuelle mer Morte. Ces lacunes dans l'histoire du bassin devraient être comblées grâce aux informations fournies par les sondages et les carottes extraites des zones centrales plus profondes du lac actuel.



Il y a environ cinq millions d'années, au début du Pliocène, le niveau des mers a augmenté de plusieurs dizaines de mètres. Les eaux de la Méditerranée ont alors pénétré dans les terres et formé une lagune, la lagune de Sodome. Plus tard, la baisse du niveau de la mer a transformé la lagune en un ou plusieurs lacs, dont la mer Morte et le lac de Tibériade sont les derniers avatars.



4. DANS LES TERRES BORDANT LA MER MORTE, sont exposées à l'air des couches géologiques formées de sédiments qui se sont déposés dans le lac Lisan, le prédécesseur du lac actuel, et dans le lac Samra, plus ancien. Les dépôts du lac Lisan se sont accumulés sur une hauteur pouvant

atteindre une quarantaine de mètres et correspondent à une période allant de 75 000 à 17 700 ans avant notre ère. Les carottes récemment prélevées au fond de la mer Morte permettent de sonder un passé encore plus reculé, allant jusqu'à 200 000 ans avant notre ère.

gypse liées à des périodes d'extrême sécheresse et de baisses du niveau d'eau, ainsi que des « couches mixtes » emmêlées, dues à des tremblements de terre.

Les couches de carbonate peuvent être datées en utilisant des techniques radiométriques (chaîne de désintégrations radioactives de l'uranium, carbone 14). En combinant les datations radiométriques et le dénombrement des couches, on peut alors démêler l'histoire hydrologique, climatique et tectonique du Proche-Orient jusqu'à une résolution saisonnière. Les recherches effectuées sur les dépôts lacustres accessibles sur la terre ferme ont ainsi fourni aux géologues de nombreuses informations. Cependant, ces dépôts de sédiments présentent d'importantes limitations. Lesquelles ?

Tout d'abord, même dans les parties les mieux préservées de la formation du Lisan le long des rives de la mer Morte, certains intervalles de temps ne sont pas représentés, soit parce que l'érosion a détruit les strates correspondantes, soit parce que le niveau du lac lors de ces périodes était plus bas que le niveau actuel. Les dépôts correspondant à ces intervalles manquants devraient cependant être présents dans les fonds de la mer Morte.

Ensuite, les dépôts sédimentaires associés aux ères glaciaires plus anciennes (époques du lac de Gomorrhe ou de celui de Samra, remontant à 740 000 ans au moins,

BIBLIOGRAPHIE

M. Stein *et al.*, *Deep drilling at the Dead Sea*, *Scientific Drilling*, vol. 11, pp. 46-47, 2011.

N. Waldmann *et al.*, *Northward intrusions of low- and mid-latitude storms across the Saharo-Arabian belt during past interglacials*, *Geology*, vol. 38, pp. 567-570, 2010.

C. Migowski *et al.*, *Holocene climate variability and cultural evolution in the Near East from the Dead Sea sedimentary record*, *Quaternary Research*, vol. 66, pp. 421-431, 2006.

Y. Bartov *et al.*, *Catastrophic arid episodes in the Eastern Mediterranean linked with the North Atlantic Heinrich events*, *Geology*, vol. 31, pp. 439-442, 2003.

Z. Ben-Avraham *et al.*, *Holocene stratigraphy of the Dead Sea : Correlation of high-resolution seismic reflection profiles to sediments cores*, *J. Geophys. Res.*, vol. 104 [B8], pp. 17617-17625, 1999.

dont les niveaux étaient plus élevés que celui du lac Lisan) sont moins bien conservés que ceux de la formation du Lisan, et leur stratigraphie est encore plus incomplète. On s'attend à ce que ces dépôts soient mieux préservés à l'intérieur du lac.

Enfin, les dépôts des périodes interglaciaires, correspondant à des climats chauds et secs, sont totalement inaccessibles en raison des bas niveaux des lacs à ces époques. Ils ne sont accessibles que dans les parties les plus profondes de la mer Morte.

Forer sous 300 mètres d'eau saturée en sel

C'est pour ces raisons que, au début des années 1990, un groupe de chercheurs a proposé de prélever une longue carotte de sédiments par un forage dans les fonds du lac actuel. Une telle opération permettrait d'obtenir une séquence continue et non perturbée de sédiments, issue de la partie la plus profonde du lac, qui n'a probablement jamais été émergée. De nombreux problèmes logistiques et financiers se sont posés dans ce point chaud (pas uniquement sur le plan géologique...) du globe. En dépit des difficultés, le groupe de recherche a convaincu plusieurs autres scientifiques de l'intérêt du projet, en les invitant à participer à l'entreprise. Des scientifiques d'Israël, des États-Unis et d'Allemagne ont sollicité le

soutien de l'ICDP (*International Continental Scientific Drilling Program*, Programme scientifique international de forages continentaux) ; ce programme met en commun des ressources allouées par différents États afin de financer des projets de recherche innovants. Le projet a fini par rassembler une équipe internationale impliquant des organismes de différents pays : Israël, l'Allemagne, le Japon, la Jordanie, l'Autorité palestinienne, la Suisse et les États-Unis. Il s'est enfin concrétisé il y a deux ans.

Forer dans la mer Morte, l'étendue d'eau la plus salée de la planète, a été une énorme entreprise logistique. À l'automne 2010, le gros de l'équipement technique et des fournitures nécessaires à l'opération a été transporté dans 15 conteneurs depuis la Turquie, où le matériel avait servi à forer un autre site passionnant pour les paléoclimatologues, le lac Van. Nous avons utilisé une plate-forme spécialement conçue (voir la figure 5) pour ce type d'opérations, et qui avait déjà servi dans de nombreux autres bassins lacustres, de la Sibérie à la Patagonie. Mais pour un lac salé comme la mer Morte, c'était une première.

Entre novembre 2010 et mars 2011, nous avons prélevé des carottes sédimentaires presque continues sous environ 300 mètres d'eau, à proximité de la zone la plus profonde de la mer Morte. La carotte la plus longue faisait 450 mètres, ce qui signifie plus de 700 mètres sous la surface ! Nous avons également extrait plusieurs autres carottes longues de plus de 300 mètres, à environ 2,5 mètres de profondeur près de la station thermique d'Eïn Guedi (voir la figure 2), où un laboratoire de campagne a été installé. Nous avons effectué sur place une série d'analyses préliminaires, immédiatement après le prélèvement des carottes, afin de nous faire une première idée des sédiments obtenus.

Qu'indiquent ces premiers examens ? Par rapport aux sédiments qui affleurent, les carottes prélevées comblent des lacunes dont souffrait l'histoire hydrologique de la région. Elles constituent un enregistrement presque continu et non perturbé, qui semble couvrir au moins les deux derniers cycles glaciation-interglaciación, soit environ 200 000 ans (voir la figure 5). Les sédiments recueillis présentent deux lithologies dominantes : des couches de sel intercalées avec de minces couches de boue, et des couches massives de marnes intercalées de minces couches de sel. Les couches de limon et de

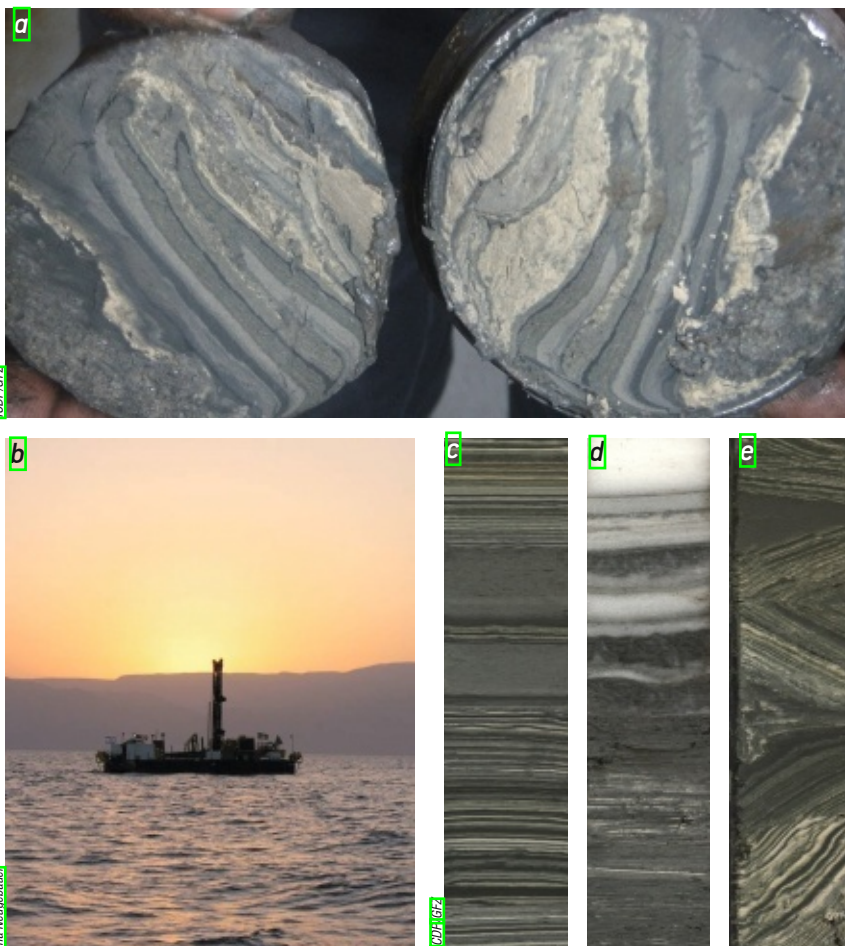
sel (et de graviers) indiquent des intervalles où le niveau du lac était très bas. En outre, une inspection préliminaire du matériau fait apparaître des structures sédimentaires spectaculaires, qui témoignent de l'activité tectonique, enregistrée dans les sédiments lacustres comme dans les pages d'un livre écrit par la nature.

Premiers résultats

Les résultats préliminaires indiquent que, au-dessous du niveau des eaux du lac, la vitesse moyenne de sédimentation est deux fois plus élevée que celle observée dans les affleurements (cette vitesse moyenne de sédimentation nous donnerait accès à 450 000 années environ, au lieu des 200 000 estimées avec les dépôts lacustres, pour une même longueur de

carotte). Dans les carottes lacustres, les couches de sel (correspondant aux périodes interglaciaires, et absentes ou éliminées par l'érosion dans les affleurements) sont en effet, pour le même intervalle temporel, deux fois plus épaisses que les couches de détritiques et d'aragonite associées aux intervalles glaciaires.

De plus, l'ensemble de l'enregistrement est épaissi par des slumps (plis créés dans des sédiments non consolidés), très probablement dus à des séismes. Lorsque la chronologie de ces événements majeurs aura été établie, les scientifiques seront en mesure d'établir une stratigraphie des événements sismiques, et ainsi d'estimer la fréquence des tremblements de terre dans cette région tectoniquement active. Une telle estimation serait précieuse pour orienter la prévision et la gestion du risque sismique.



5. LES CAROTTES DE SÉDIMENTS prélevées au fond de la mer Morte à l'aide d'une plate-forme de forage [b] comportent notamment des sédiments boueux [a], constitués d'aragonite et de matériels détritiques. Deux profils dominent, l'un [c] où des couches de marnes sont intercalées de minces couches d'aragonite, l'autre [d] où des couches de sel sont intercalées de minces couches de boues. Le second correspond à des périodes où le niveau du lac était très bas. En outre, des structures où l'orientation des couches change brusquement [e] témoignent d'une activité tectonique intense.

LA VIE POUSSÉE À SES EXTRÊMITÉS

La mer Morte constitue un lac qualifié de « mort », parce que sa salinité est telle que les organismes aquatiques macroscopiques, tels les poissons et les plantes aquatiques, ne peuvent y vivre. Cependant, des micro-organismes adaptés à la très forte salinité sont présents.

À l'aide de techniques particulières telles que la microscopie à fluorescence par coloration au DAPI, Daniel Ariztegui (l'un des auteurs) et son collègue Camille Thomas, à l'Université de Genève, ont détec-

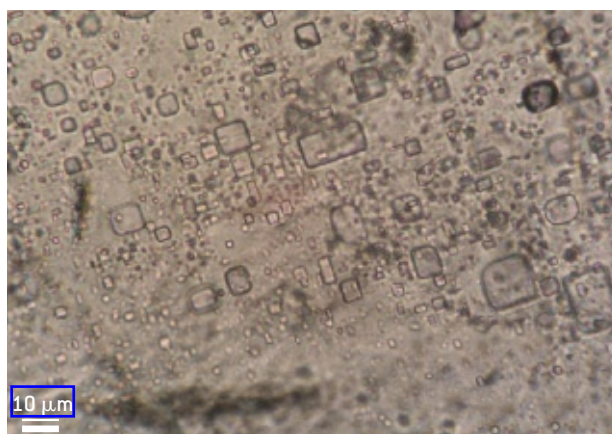
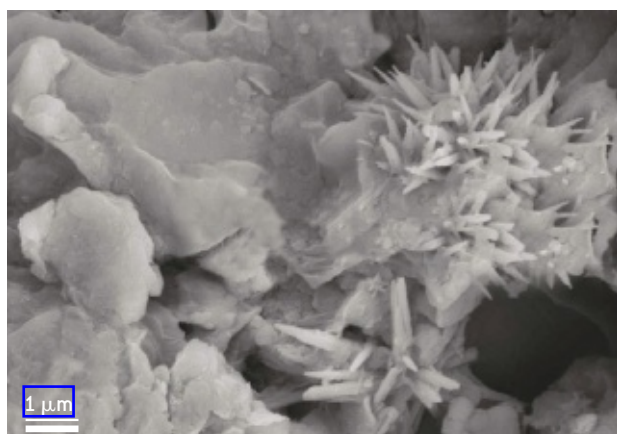
té la présence de microbes dans les 130 premiers mètres de sédiments de la carotte prélevée au centre du lac. Il reste à déterminer s'il s'agit de microbes encore vivants, ou d'une activité microbienne passée.

Plusieurs intervalles lithologiques sont dominés par l'aragonite, avec des cristaux en forme d'aiguilles et d'étoiles, un carbonate de calcium précipité directement (voir la photographie ci-dessous à gauche). Des précurseurs de minéraux ferreux en forme de glo-

bules ou de framboises sont également présents, ce qui indique une minéralisation d'origine microbienne. De même, la rive occidentale de la mer Morte présente aujourd'hui de minces tapis microbiens de couleur noire, intercalés avec des couches blanches d'aragonite.

Les intervalles interglaciaires riches en sel contiennent de petites inclusions fluides (voir la photographie ci-dessous à droite), qui sont en cours d'étude en collaboration avec Véronique Gardien,

de l'Université de Lyon. On espère ainsi déterminer la température et d'autres paramètres physico-chimiques ayant prévalu lors de la précipitation des cristaux de sel. De façon analogue, ces inclusions fluides sont examinées pour détecter des restes microbiens qui y auraient été piégés. L'étude de l'influence microbienne sur ces dépôts devrait apporter un éclairage nouveau sur les conditions dominantes dans lesquelles les sédiments de la mer Morte se sont accumulés au fil du temps.



Camille Thomas

Mais les découvertes les plus frappantes de l'opération de forage étaient d'une part une couche de galets trouvée à environ 235 mètres sous la surface des sédiments et correspondant à la période interglaciaire ayant précédé l'Holocène, d'autre part la présence d'une activité microbienne jusqu'à 130 mètres au-dessous du fond du lac (voir l'encadré ci-dessus). La couche de galets semble être un dépôt de plage et rien de tel n'a été trouvé à aucun autre niveau dans les carottes. Cette couche indiquerait que la mer Morte s'est pratiquement asséchée il y a environ 120 000 ans. Des analyses sont en cours pour confirmer ou infirmer cette hypothèse.

Aujourd'hui, le niveau de la mer Morte baisse rapidement parce qu'il ne s'y déverse pas d'eau douce : presque toutes les eaux de ruissellement sont utilisées par les populations de la région. Si l'hypothèse de l'assèchement de la mer Morte est confirmée, cela signifie que dans le passé géologique, sans intervention de l'homme, le ruissellement aurait fortement diminué ou se serait

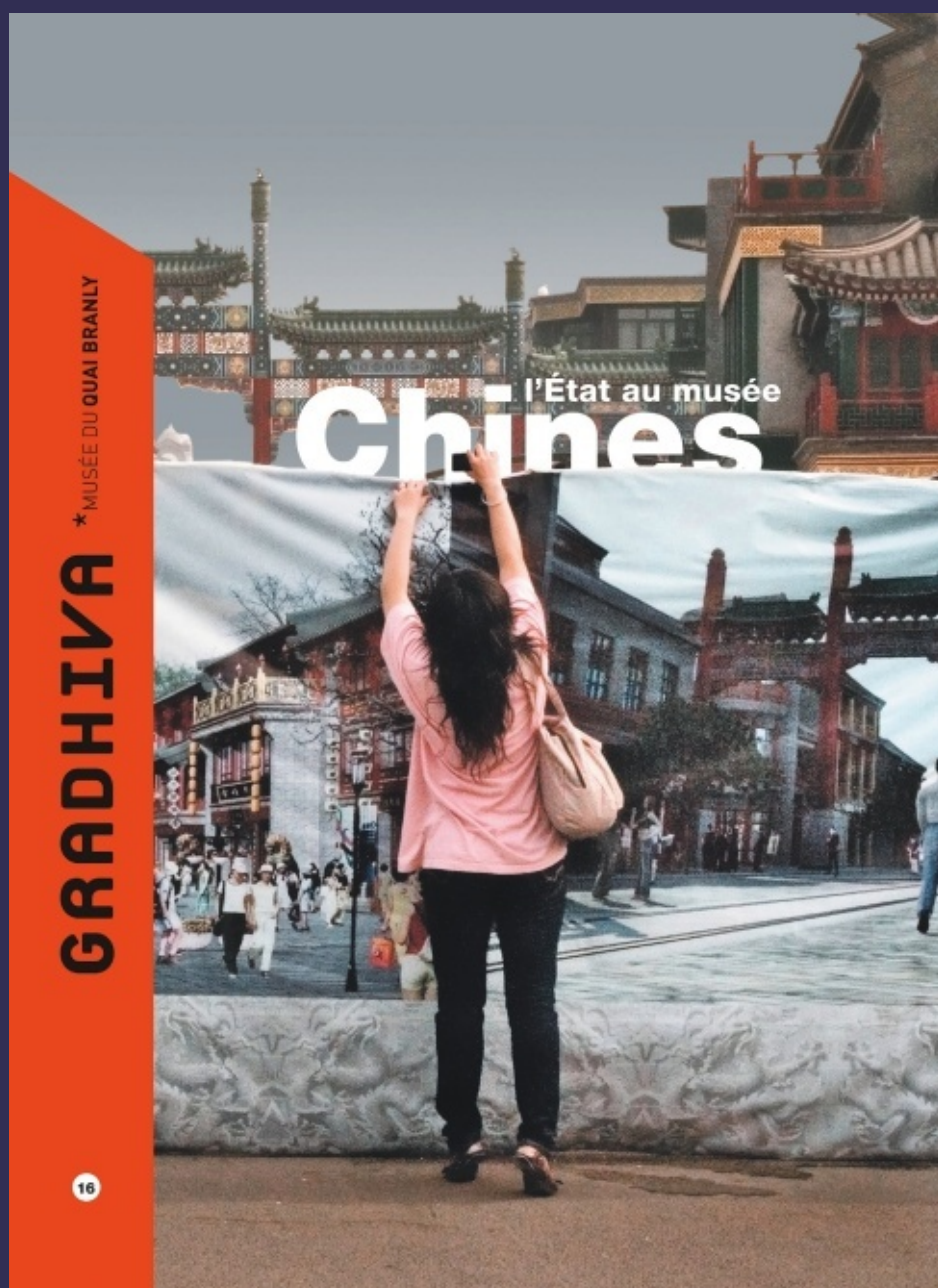
presque interrompu. Une situation qui est à comparer avec celle d'aujourd'hui : les modèles climatiques prédisent que, en raison du renforcement de l'effet de serre dû aux activités humaines, cette région sera dans un proche avenir plus aride, avec des températures moyennes plus élevées. Cette précieuse ressource qu'est l'eau douce, déjà pleinement exploitée, deviendra encore plus rare.

Ainsi, le forage dans les fonds de la mer Morte a d'ores et déjà livré quelques informations intéressantes. Il ne s'agit là que d'un début : l'étude détaillée des carottes prélevées est en cours et ses résultats sont attendus avec impatience par les scientifiques. Des résultats qui permettront non seulement de préciser l'histoire géologique du bassin de la mer Morte, mais aussi de mieux comprendre les conditions environnementales ayant régné durant l'émergence de l'espèce humaine et ses migrations par le corridor de la mer Morte, et de mieux évaluer les risques climatiques et sismiques aux différentes échelles de temps. ■

★ MUSÉE DU QUAI BRANLY
là où dialoguent les cultures

LA REVUE GRADHIVA★

EN VENTE EN LIBRAIRIE
ET EN LIGNE SUR <http://www.librairie-epona.fr/revues/gradhiva.html>



**Chines,
l'État au musée**

Coordonné par Anne-Christine Trémon
et Brigitte Baptandier

Comment et pourquoi les musées sont-ils créés en Chine ? Quelles politiques de valorisation du patrimoine, de l'histoire, de l'art sont actuellement mises en œuvre, aussi bien en République populaire de Chine (RPC) qu'à Taïwan ? Souvent moins connus et étudiés, **les musées et autres outils de transmission patrimoniale participent eux aussi du développement chinois** : alors qu'on en comptait une vingtaine en 1949, ils sont aujourd'hui plus de 2 300 en RPC. S'intéresser à leur genèse et à leur fonctionnement, c'est être directement aux prises avec la société chinoise d'aujourd'hui et les grandes questions qui la traversent : **statut des minorités, interactions souvent conflictuelles entre les différents échelons de gouvernement, place accordée à la religion, regard et discours du pays sur ses traditions et son histoire**, etc. Autant de problématiques abordées par ce nouveau numéro de GRADHIVA qui s'attache à proposer une ethnographie de divers projets muséaux et patrimoniaux et, partant, à esquisser une anthropologie politique des États-nations chinois et taïwanais.

Retrouvez tous les numéros de GRADHIVA sur www.quaibrany.fr/gradhiva

Bon nombre de physiciens théoriciens soutiennent une vision pointilliste du monde aux plus petites échelles. Toutefois, un examen des lois de la nature suggère un monde physique continu.

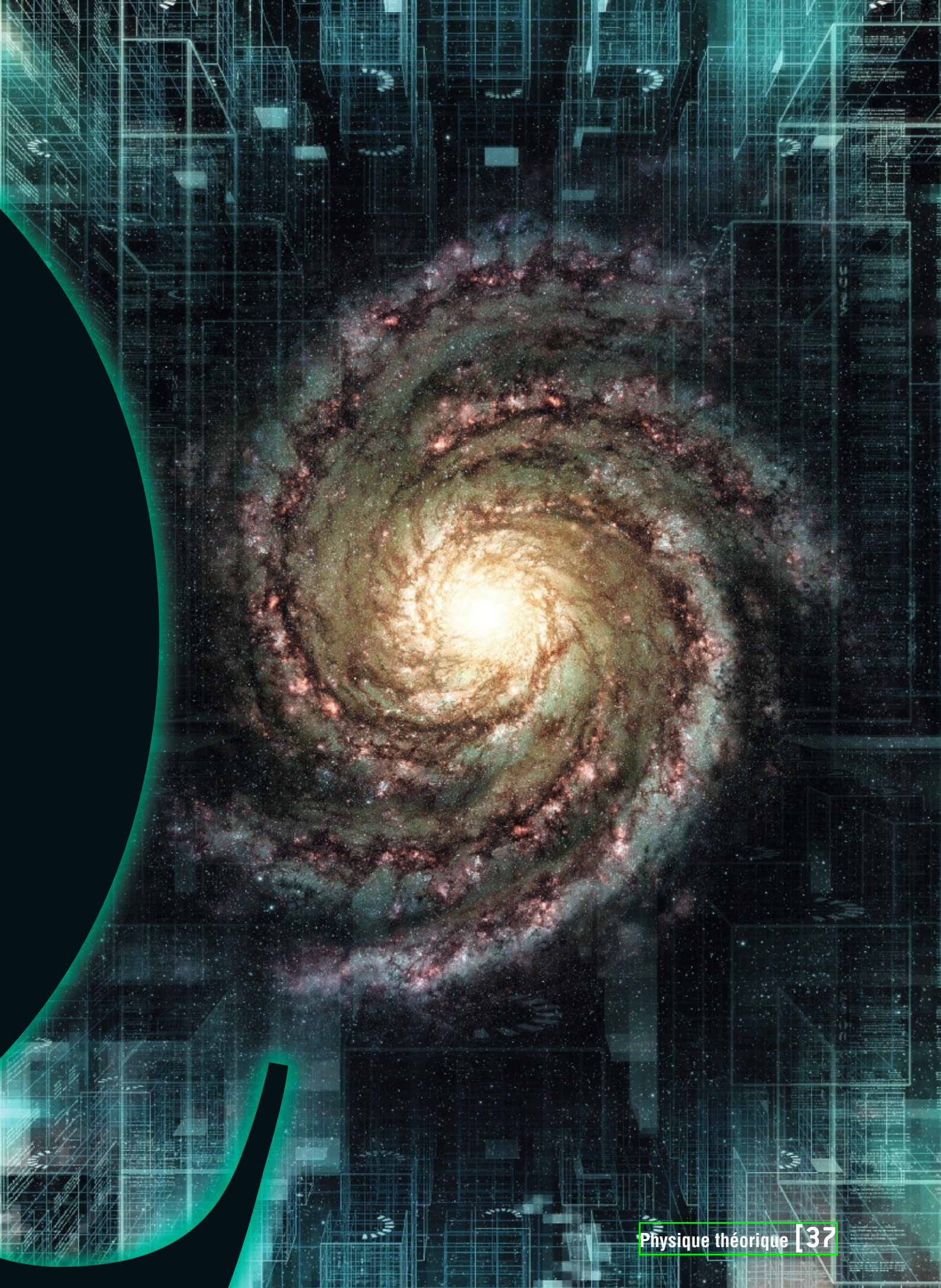
Quantique mais non discret

David Tong

L'ESSENTIEL

- On se représente en général la mécanique quantique comme discrète par nature. Toutefois, ses équations sont formulées en termes de grandeurs continues. Les valeurs discrètes, ou quanta, émergent de la façon dont le système est contraint.
- Selon les partisans d'un monde discret, les grandeurs physiques sont discrètes, mais donnent l'illusion d'un continuum à grande échelle.
- L'idée d'un monde discret semble incompatible avec la chiralité, une asymétrie gauche-droite de certaines particules.

© Keith Brown/Monde illustré S. I. P. & G.



A la fin du XIX^e siècle, le mathématicien allemand Leopold Kronecker déclarait : « Dieu a créé les nombres entiers, tout le reste est l'œuvre de l'homme. » Il pensait que les nombres entiers jouent un rôle fondamental en mathématiques. Pour les physiciens d'aujourd'hui, cette citation a un autre retentissement. Elle fait écho à une vision qui s'est imposée ces dernières décennies, à savoir que la nature serait essentiellement discrète et non continue, que les éléments de base de la matière et de l'espace-temps peuvent être comptés un par un. Cette idée remonte aux atomistes de la Grèce ancienne, et elle nous parle davantage encore à l'ère numérique. De nombreux physiciens en sont arrivés à se représenter le monde naturel comme un immense ordinateur décrit par des bits d'information, et les lois de la physique comme un algorithme, semblable à la pluie de chiffres verts que Neo voit à la fin du film *Matrix* (1999).

Mais est-ce vraiment ainsi que les lois de la physique sont faites ? Même si cela n'est pas dans l'air du temps, je suis loin d'être le seul scientifique à penser que la réalité est au fond continue plutôt que discrète. Selon cette vision, le monde est un continuum : zoomez tant que vous voudrez, vous ne trouverez pas d'éléments de base irréductibles.

Les quantités physiques ne sont pas des nombres entiers, mais des nombres réels, des nombres continus avec une infinité de chiffres après la virgule. Les fans de *Matrix* seront déçus de l'apprendre, mais les lois actuelles de la physique présentent certaines caractéristiques que personne ne sait simuler sur ordinateur, quelle que soit sa capacité de mémoire. Il est essentiel

L'AUTEUR



David TONG est professeur de physique théorique à l'Université de Cambridge,

en Grande-Bretagne.

Cet article est adapté de l'essai présenté en 2011 par D. Tong au troisième concours d'essais de l'Institut des questions fondamentales (FQXi, une association internationale à but non lucratif, www.fqxi.org), où la question posée était : « La réalité est-elle numérique ou analogique ? » L'essai de D. Tong a été classé deuxième ex aequo.

BIBLIOGRAPHIE

A. Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell*, Princeton University Press (2^e édition), 2012.

D. B. Kaplan, *Chiral symmetry and lattice fermions*, <http://arxiv.org/abs/0912.2560>.

F. Tanedo, *Helicity, chirality, mass, and the Higgs*, www.quantumdiaries.org/2011/06/19/helicity-chirality-mass-and-the-higgs.

d'intégrer cet aspect pour développer une théorie physique complètement unifiée.

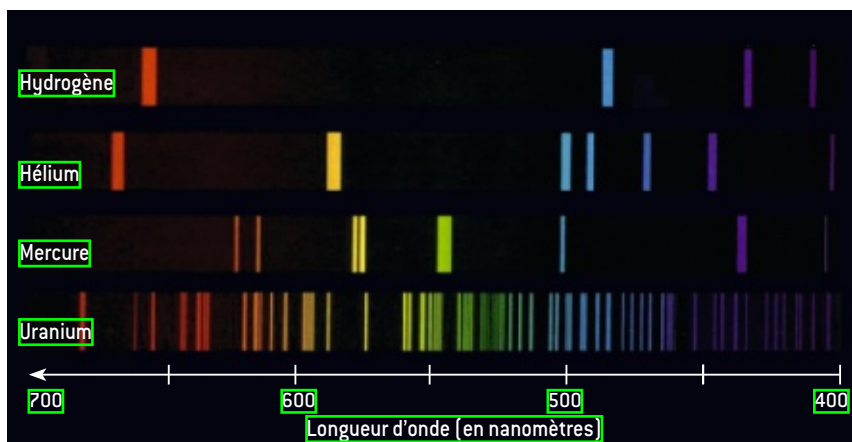
Le débat entre le continu et le discret est l'un des plus anciens de la physique. Tandis que les atomistes concevaient la réalité comme discrète, d'autres philosophes grecs (Aristote par exemple) se la représentaient comme un continuum. À l'époque d'Isaac Newton, aux XVII^e et XVIII^e siècles, les philosophes de la nature étaient partagés entre théories corpusculaires (discrètes) et théories ondulatoires (continues). À l'époque de Kronecker, les avocats de l'atomisme, tels que John Dalton, James Clerk Maxwell et Ludwig Boltzmann, savaient même dériver, sur des bases atomistiques, les principes de la chimie et de la thermodynamique. Mais de nombreux scientifiques restaient sceptiques.

Wilhelm Ostwald, lauréat du prix Nobel de chimie en 1909, faisait remarquer que les principes de la thermodynamique ne se réfèrent qu'à des quantités continues telles que l'énergie. De même, la théorie électromagnétique de Maxwell décrit les champs électriques et magnétiques comme des grandeurs continues. En 1882, Max Planck, qui sera un précurseur de la physique quantique, concluait un important article par ces mots : « Malgré le succès actuel de la théorie atomique, elle devra à terme être abandonnée au profit de l'hypothèse d'une matière continue. »

Des entiers arbitraires

L'un des arguments les plus puissants des partisans du continu est l'apparence arbitraire du discret. À titre d'exemple, considérons le nombre de planètes dans le Système solaire. À l'école, on m'a appris qu'il y en avait neuf. En 2006, les astronomes ont officiellement déchu Pluton de son rang de planète, et il n'en reste plus que huit. Dans le même temps, ils ont introduit une liste de « planètes naines ». Si vous incluez ces dernières, leur nombre s'élève alors à 13.

En résumé, la seule réponse honnête à la question du nombre de planètes est que cela dépend de la façon dont vous comptez. La ceinture de Kuiper, au-delà de Neptune, contient des objets dont la taille varie entre quelques micromètres et quelques milliers de kilomètres. Vous ne pouvez compter le nombre de planètes que si vous faites une distinction arbitraire entre ce qui est une planète, ce qui est une planète naine, et ce



1. LES SPECTRES D'ÉMISSION DES ATOMES ont des parties discrètes, constituées de longueurs d'onde que l'on peut étiqueter à l'aide de nombres entiers.

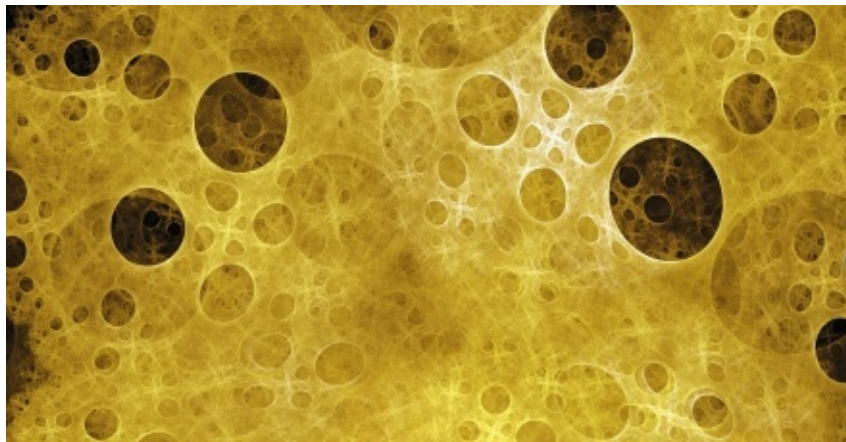
qui est simplement un gros morceau de roche ou de glace.

La mécanique quantique a transformé le débat discret-continu (le terme *quantum* a été introduit pour désigner une quantité minimale bien définie, d'énergie en l'occurrence). Si la définition d'une planète peut être arbitraire, ce n'est pas le cas de la définition d'un atome ou d'une particule élémentaire. Les entiers qui numérotent les éléments chimiques sur le tableau de Mendeleïev (et qui, nous le savons aujourd'hui, correspondent aux nombres de protons des atomes en question) sont objectifs. Quels que soient les développements que la physique nous réserve, je suis prêt à miser gros sur le fait que nous n'observerons jamais d'élément à $\sqrt{500}$ protons, situé entre le titane et le vanadium. Les entiers en physique atomique ont vocation à rester.

Des entiers nés d'une équation continue

Un autre exemple est fourni par la spectroscopie, l'étude de la lumière émise ou absorbée par la matière. Un atome d'un type donné ne peut émettre que de la lumière de longueurs d'onde (ou couleurs) particulières, ce qui constitue une empreinte caractéristique de chaque élément. Contrairement aux empreintes digitales humaines, les spectres atomiques obéissent à des règles mathématiques précises, et ces règles mettent en jeu des entiers. Les premières tentatives pour comprendre la théorie quantique, notamment par le physicien danois Niels Bohr, plaçaient l'aspect discret au cœur de l'édifice.

Mais l'interprétation de Bohr n'a pas eu le dernier mot. En 1925, l'Autrichien Erwin Schrödinger a développé une approche alternative de la théorie quantique, fondée sur la notion d'ondes. L'équation qu'il a formulée pour décrire l'évolution de ces ondes au cours du temps ne contient que des grandeurs continues, et pas d'entiers. Mais quand on résout l'équation de Schrödinger pour un système donné, on assiste à un tour de magie mathématique. Prenons l'atome d'hydrogène : les électrons sont en orbite autour du noyau à des niveaux d'énergie bien particuliers. Cela se traduit par un spectre spécifique de l'atome. L'atome est analogue à un tuyau d'orgue, qui produit une série discrète de notes alors que le mouvement de l'air est continu. Au moins en ce qui concerne l'atome, la leçon est claire : Dieu n'a pas fait les nombres entiers ; il a



2. LE NOMBRE DE DIMENSIONS n'est pas forcément un entier. Ainsi, cette éponge fractale peut être caractérisée par une dimension comprise entre deux et trois.

fait les nombres réels, et le reste est le fait de l'équation de Schrödinger.

En d'autres termes, les entiers ne sont pas des hypothèses de la théorie, comme le pensait Bohr, mais des conséquences. Les entiers sont un exemple de ce que les physiciens appellent une quantité émergente. Dans cette perspective, le terme de mécanique « quantique » est impropre : la théorie ne contient pas de quanta (c'est-à-dire des quantités discrètes) dans sa formulation. Dans des systèmes tels que l'atome d'hydrogène, les processus décrits par la théorie engendrent du discret à partir de la continuité sous-jacente.

Peut-être plus surprenant encore, l'existence d'atomes, ou de toute particule élémentaire, n'est pas une hypothèse de nos théories. Les physiciens enseignent au quotidien que les briques de la nature sont des particules discrètes telles que l'électron ou le quark. C'est faux. Les éléments fondamentaux de nos théories ne sont pas des particules, mais des champs : des objets continus, semblables à des fluides, qui occupent tout l'espace. Les champs électriques et magnétiques en sont des exemples familiers, mais il existe aussi un champ électronique pour l'électron, un champ pour chaque type de quark, un champ de Higgs, et ainsi de suite. Les objets que nous qualifions de particules élémentaires ne sont pas fondamentaux, ce sont en fait des modes d'oscillation de champs continus.

Un sceptique pourrait rétorquer que des entiers sont bien inscrits dans les lois de la physique. Par exemple, ces lois décrivent trois types de neutrinos, six types de quarks (avec pour chacun trois variétés ou « couleurs »), et ainsi de suite. Des entiers, partout des entiers. Vraiment ? Tous ces exemples

dénombrent en fait les espèces de particules du modèle standard de la physique des particules, des quantités pour lesquelles il est difficile d'obtenir une précision mathématique quand les particules interagissent. En effet, ces dernières se transforment : un neutron peut se scinder en un proton, un électron et un neutrino. Devrions-nous alors considérer que nous avons affaire à une, trois ou quatre particules ? L'affirmation de l'existence de trois sortes de neutrinos, six sortes de quarks, etc., est un artifice dû à la non-prise en compte des interactions des particules.

Un nombre incertain de dimensions ?

Un autre exemple d'entier intervenant dans les lois de la physique est le nombre de dimensions de l'espace. On en observe trois. Mais en sommes-nous certains ? Le mathématicien franco-américain Benoît Mandelbrot a fait remarquer que le nombre de dimensions n'est pas nécessairement un entier. La côte de la Grande-Bretagne, par exemple, a une dimension (dite fractale) d'environ 1,3. De plus, dans de nombreuses propositions de théories unifiées, telles que la théorie des cordes, il y a ambiguïté sur le nombre de dimensions de l'espace : des dimensions spatiales peuvent émerger ou se dissoudre.

Je me hasarde à dire qu'il pourrait n'y avoir qu'un seul entier véritable dans toute la physique. Les lois de la physique ne prennent en compte qu'une seule dimension pour le temps. S'il n'y avait pas précisément une dimension temporelle, il semble que la physique serait incohérente.

Même si nos théories actuelles supposent que la réalité est continue, beaucoup

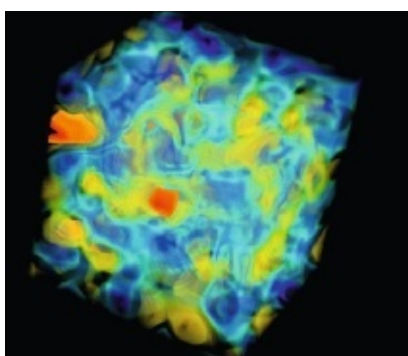
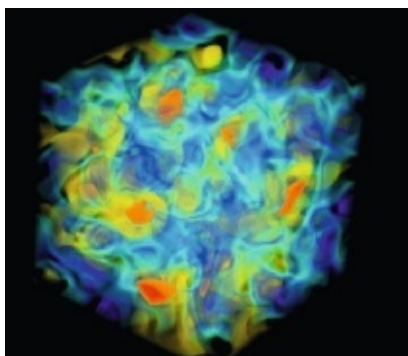
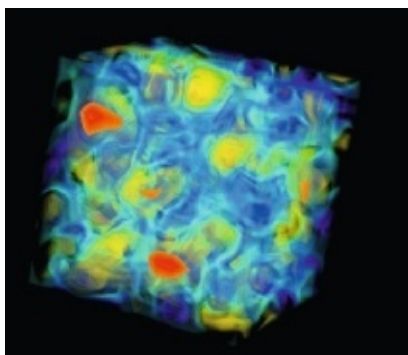
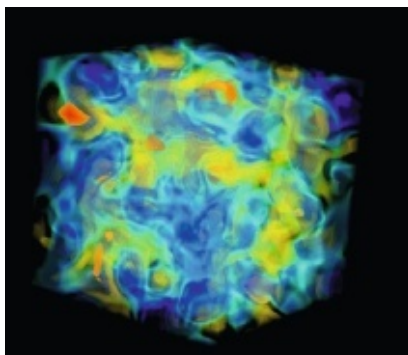
de mes collègues physiciens pensent malgré tout qu'une réalité discrète est sous-jacente. Ils mettent en avant des exemples montrant comment la continuité peut émerger de la quantification. Aux échelles macroscopiques de notre expérience quotidienne, l'eau contenue dans un verre semble lisse et continue. C'est seulement quand on l'examine de beaucoup plus près que l'on discerne les constituants atomiques. Un mécanisme de ce type pourrait-il être à la base de la physique ? Si nous regardions à un niveau plus profond, les champs quantiques, voire l'espace-temps lui-même, révéleraient-ils eux aussi une structure sous-jacente discrète ?

Nous ignorons la réponse à cette question, mais 40 années de tentatives de simulation du modèle standard sur ordinateur livrent un indice. Pour réaliser une telle simulation, il faut tout d'abord prendre les équations, exprimées en termes de grandeurs continues, et en trouver une formulation discrète, compatible avec les bits d'information que les ordinateurs manipulent. Or en dépit de plusieurs décennies d'efforts, personne n'y est encore parvenu. Et cela constitue l'un des problèmes ouverts les plus importants de la physique théorique, bien que ce soit rarement évoqué.

Problématiques fermions

Les physiciens ont développé une version discrétisée de la théorie quantique des champs, la « théorie des champs sur réseau », où l'espace-temps continu est remplacé par un réseau de points. Les ordinateurs évaluent les champs en ces points pour approximer un champ continu. Mais cette technique a des limites. La difficulté vient des électrons, des quarks et des autres particules de matière, les fermions (contrairement aux autres particules – les bosons –, si l'on fait tourner un fermion de 360 degrés, on ne retrouve pas l'objet de départ ; pour cela, il faut le faire tourner de 720 degrés). Les fermions (ou plutôt leurs champs) résistent à la mise sur réseau. Dans les années 1980, le Danois Holger Bech Nielsen et le Japonais Masao Ninomiya ont prouvé un théorème selon lequel il est impossible de discrétiser le type le plus simple de fermion.

Cependant, la validité de tels théorèmes n'est pas supérieure à celle de leurs hypothèses. Dans les années 1990, des théoriciens, en particulier David Kaplan, maintenant à l'Université de Washington, et Herbert



3. CETTE VISUALISATION d'une grandeur nommée charge topologique à quatre instants différents provient d'une simulation numérique sur réseau (un ensemble constitué d'un nombre fini de points) de la chromodynamique quantique – la théorie décrivant les quarks, les gluons et l'interaction forte à laquelle ces particules sont soumises. Une telle simulation sur réseau ne semble pas réalisable pour certains types de particules intervenant dans le modèle standard, qui décrit aussi l'interaction électromagnétique et l'interaction faible.

Neuberger de l'Université Rutgers, ont introduit diverses méthodes astucieuses pour mettre des fermions sur réseau. Les théories quantiques des champs se présentent sous de nombreuses formes, chacune avec différents types possibles de fermions, et l'on parvient maintenant à les formuler presque toutes sur réseau. Il ne reste qu'une classe de théories des champs que l'on ne sache toujours pas mettre sur réseau. Et malheureusement, le modèle standard en fait partie : nous savons manipuler toutes sortes de fermions hypothétiques, mais pas ceux qui existent en réalité.

Les fermions du modèle standard ont une propriété très particulière. Ceux qui tournent sur eux-mêmes dans le sens contraire des aiguilles d'une montre sont sensibles à l'interaction faible, mais pas ceux qui tournent dans le sens des aiguilles d'une montre. La théorie est dite chirale. Or une théorie chirale est délicate : des effets subtils, qualifiés d'anomalies, menacent en permanence de la rendre incohérente. Ces théories ont jusqu'à présent résisté à toutes les tentatives de simulation sur ordinateur.

Mais la chiralité n'est pas un défaut du modèle standard susceptible de disparaître dans une théorie plus profonde ; elle en est une caractéristique centrale. À première vue, le modèle standard, fondé sur trois forces liées les unes aux autres, apparaît comme une construction arbitraire. C'est seulement lorsqu'on réfléchit aux fermions chiraux que sa véritable beauté émerge. C'est un puzzle parfait, dont les trois composantes sont emboîtées de la seule manière possible. Dans le modèle standard, c'est la nature chirale de ses fermions qui permet à tous les éléments de bien s'imbriquer.

Les scientifiques ne savent pas très bien que conclure de notre incapacité à simuler complètement le modèle standard sur ordinateur. Il est difficile de tirer des conclusions solides d'une inaptitude à résoudre un problème ; il est possible que ce soit juste un problème très ardu qui finira par être résolu par des techniques classiques. Mais certains aspects du problème laissent penser qu'il est plus profond que cela. Les obstacles en cause sont intimement liés à des propriétés topologiques et géométriques. La difficulté de modéliser sur réseau des fermions chiraux indique peut-être quelque chose de plus important : que les lois de la physique ne sont pas, fondamentalement, discrètes. Nous n'habitons pas une simulation numérique. ■

**l'ESPCI ParisTech, l'ECPM, Chimie ParisTech
et l'ENSIC vous invitent au :**

FORUM HORIZON CHIMIE

Jeudi 31 Janvier 2013
9h00 / 18h00

**27^{ème}
édition**

**Entrée
libre**

Maison de la Chimie
28 bis rue Saint-Dominique
75007 PARIS
Métro Invalides

Renseignements :
01 45 35 41 82
www.horizon-chimie.fr

La domestication

Il y a plus de 30 000 ans, des groupes de chasseurs préhistoriques auraient intégré en leur sein des louveteaux.

Ainsi se serait enclenché le processus qui, à partir de ce fauve foncièrement social qu'est le loup, a engendré le chien.

du loup

Le chien, un loup rempli d'humanité.
Jean de La Fontaine (1621-1695).

Pour être vraie, cette frappante formule de Jean de La Fontaine sous-entend que le chien descend du loup. Est-il possible que les formes colorées si diverses de cet animal domestique soient issues du seul *Canis lupus*? Ou bien, comme le crurent Charles Darwin (1809-1882) et le cofondateur de l'éthologie Konrad Lorenz (1903-1989), descendait-il aussi du chacal, lui aussi du genre *Canis*, voire de toute une variété de canidés sauvages : renards, dingos, lycaons...? Jusqu'à ces dernières années, il était tout simplement impossible de déterminer l'origine du chien. Puis la biologie moléculaire a tranché : le chien est le descendant du loup et de lui seul, et la jolie formule de La Fontaine s'est révélée prémonitrice ! Le chien est une création de l'homme préhistorique par sélection artificielle. J'essaierai ici de dater et de discuter le processus de cette création, qui, manifestement, a joué un rôle important dans l'évolution de notre espèce. Je m'appuierai ce faisant sur mon expérience de l'élevage d'un loup au sein d'une famille humaine.

Pierre Jouventin

L'ESSENTIEL

- **Espèce au faîte de la socialité**, les loups vivent au sein de meutes hiérarchisées pratiquant une chasse coordonnée.
- Cette structure sociale a facilité l'intégration de louveteaux au sein de groupes humains.
- Au fil des générations, les loups domestiqués se sont transformés sous l'effet de la sélection opérée par l'homme, ce qui a conduit au chien.
- Grâce à la domestication des loups, les hommes préhistoriques ont pu chasser de façon plus efficace.

BRUNO CAHILLON

1. DES CHASSEURS GRAVETTIENS, antérieurs à la dernière glaciation, capturent les louveteaux non sevrés d'une meute de loups. Ils les apporteront ensuite à leurs femmes qui les nourriront au sein afin de les intégrer à la horde humaine. Ils en feront ainsi des chiens, précieux auxiliaires de chasse.

Moins dangereux que le chien

Le loup a toujours occupé la première place dans notre imaginaire animalier. Pour autant, les connaissances précises sur ses mœurs dans la nature, pour la plupart acquises par les biologistes nord-américains, datent de moins d'un demi-siècle. Aussi n'est-il pas étonnant que sur un sujet aussi crucial que le danger que cet animal représente pour nous, les avis s'opposent d'une discipline et d'un continent à l'autre. Jean-Marc Moriceau, historien membre de l'Institut universitaire de France, a sous-titré *3 000 attaques sur l'homme en France XV^e-XX^e siècles* son livre récent *Histoire du méchant loup*. Mais en Amérique du Nord, la prime qui avait été promise à celui qui prouverait une attaque sur un humain n'a jamais pu être attribuée... Il est en fait très difficile de distinguer les véritables attaques de celles de loups enrégés et de

chiens errants, autrement plus communes. Depuis 20 ans que le loup est de retour en France, aucune morsure de loup sur l'homme n'a été signalée, alors que des milliers de personnes mordues par des chiens se présentent chaque année aux services d'urgences ; 33 d'entre elles sont mortes en 20 ans... Comme le requin, le loup a très mauvaise réputation, sans doute parce que les cadavres dévorés à la suite de suicides ou pendant les guerres ont été interprétés comme des victimes d'attaques. En tout cas, aujourd'hui en France, le loup représente un risque statistiquement nul, alors que les morsures de chien constituent un problème de santé publique...

Loin d'être ce que suggère la très ancienne locution *Homo homini lupus est* (L'homme est un loup pour l'homme), cet animal farouche et à juste titre craintif est en réalité au faîte de la socialité. Sa niche écologique consiste en une adaptation comportementale à la chasse coordonnée en groupes, qui lui permet de se nourrir de proies jusqu'à dix fois plus grosses que lui. En hiver, dans les déserts arctiques, c'est la solution de survie quand les baies et les petites proies ont disparu. La meute est constituée d'une dizaine d'individus strictement hiérarchisés, chaque sexe étant inféodé au membre de même sexe du couple reproducteur. Il n'y a qu'un couple reproducteur par meute – fidèle d'une année à l'autre – et tous nourrissent ses jeunes. Marquages olfactifs et hurlements se combinent pour exploiter de façon optimale l'espace et ses ressources naturelles, dont l'abondance régule les populations de proies et de prédateurs, comme il est de règle dans la nature.

Ces dernières années, il a été montré que la présence de ce superprédateur, loin de nuire aux échelons inférieurs de la pyramide alimentaire et donc à la biodiversité,

L'AUTEUR



Pierre JOUVENTIN, écoéthologue et directeur de recherche émérite du CNRS, a dirigé pendant près de 15 ans le Laboratoire CNRS d'écologie de Chizé, dans le département des Deux-Sèvres.

BIBLIOGRAPHIE

P. Jouventin, *Kamala, une louve dans ma famille*, Flammarion, 2012. et <http://kamala-louve.fr/>

M. Germonpré et al., *Fossil dogs and wolves from Palaeolithic sites in Belgium, the Ukraine and Russia: osteometry, ancient DNA and stable isotopes*, *Journal of Archaeological Science*, vol. 36, pp. 473-490, 2009.

J.-M. de Landry, *Le loup*, Delachaux & Niestlé, 2006.

E. Teroni et J. Cattet, *Le chien, un loup civilisé*, Les Éditions de l'Homme, 2004.

Claude-Marie Vadrot, *Le roman du loup*, Les Éditions du Rocher, 2009.

2. LA DOMESTICATION DU LOUP précède celle des autres animaux d'au moins 20 000 ans.

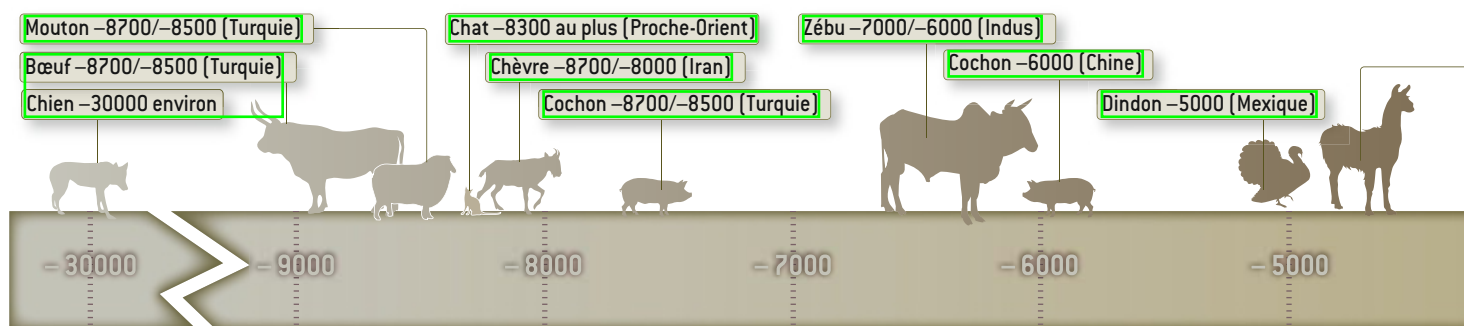
les favorise... L'exemple emblématique de cette réalité est celui du parc de Yellowstone, aux États-Unis, où l'éradication du loup a entraîné des famines et des épidémies chez les ongulés, dont il éliminait les individus malades. Il a fallu réintroduire le loup pour éviter le surpâturage et maintenir ses proies en bonne santé!

Le chien, difficile objet d'étude scientifique

Le chien paraît d'un abord plus facile que son cousin, mais, excepté dans les disciplines vétérinaires, son étude scientifique est elle aussi récente. Il tend à devenir un sujet à la mode, bien que ce fût longtemps l'inverse. Ainsi, le père de Charles Darwin se lamentait des goûts vulgaires de son rejeton : « Tu ne t'occupes que de chasse, de chiens et d'attraper des rats : tu seras le déshonneur de la famille ! » Aujourd'hui, ce fils, qui a découvert les lois de la sélection naturelle en observant les techniques de sélection des éleveurs, est une grande figure de la science et les connaissances avancent très vite sur le chien... ou plutôt les chiens, tant ils sont divers.

Si les scientifiques ont mis tant de temps à s'intéresser au chien, c'est parce que cet animal commun est bien plus difficile à étudier qu'un animal sauvage : le mode de vie de ce dernier dans la nature explique ses particularités, qui sont le plus souvent des adaptations au milieu. Aussi n'est-il guère étonnant que Raymond et Lorna Coppinger, un couple de spécialistes américains du chien, continuent pour expliquer l'origine du chien à défendre l'hypothèse de l'hybridation entre espèces, fortuite dans la nature ou volontaire en captivité.

Quelques gènes de différents canidés ont certes été trouvés dans le génome de certaines races de chien, mais l'affaire semble



close: les données actuelles rendent difficile la réhabilitation de l'ancienne hypothèse. La distance génétique entre le chien et le loup est de seulement 0,2 pour cent, alors qu'entre ce dernier et le plus proche canidé (le coyote), elle est de quatre pour cent. Presque 400 races de chiens ont été sélectionnées par l'homme, la plupart depuis seulement deux siècles, et les distances génétiques entre chiens peuvent être plus grandes qu'entre loup et chien en moyenne. D'ailleurs, certaines races, tels les chiens de traîneaux et le chien africain basenji, présentent des caractères intermédiaires entre loups et chiens de races modernes: par exemple, ils n'aboient pas, mais hurlent. Les apparences sont trompeuses et le pékinois (un tout petit chien de compagnie originaire de Chine) est plus proche de son ancêtre que le berger allemand ou chien-loup!

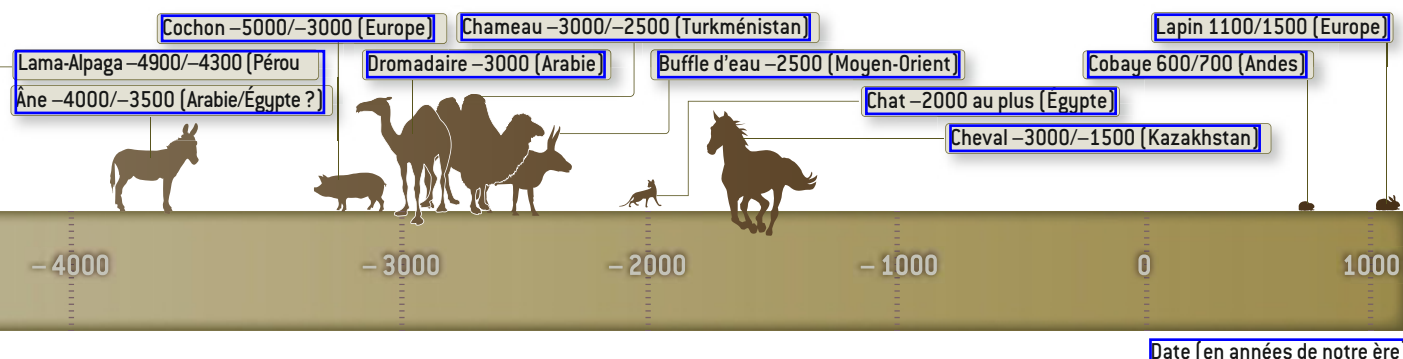
La domestication la plus ancienne

Ainsi, nos connaissances sur le loup et le chien ont récemment progressé de façon significative: nous sommes enfin certains que le chien n'est qu'un loup domestiqué, mais le statut respectif des deux cousins reste incertain. Il reste par ailleurs à expliquer comment l'homme a pu transformer un fauve en toutou. À ce propos, la première question consiste à se demander combien de temps a duré la domestication du loup. Or, et sans doute est-ce l'une des découvertes les plus significatives de l'année (passée quasi inaperçue), on vient de prouver que la domestication du loup s'est faite au Paléolithique, il y a plus de 30 000 ans.

On considérerait en effet depuis des décennies que le chien avait été domestiqué il y a quelque 9 000 ans, ce qui suffisait à en faire la première espèce domestique.



3. CANIS LUPUS (LE LOUP) ET CANIS LUPUS FAMILIARIS (LE CHIEN) sont souvent considérés comme deux versions de la même espèce, l'une sauvage et l'autre domestique. Cela semble à peine croyable, tant les chiens sont de formes variables, les plus grandes pouvant être plus de 200 fois plus lourdes que les plus petites. Tandis que *Canis lupus* (en haut) est un animal social vivant et chassant en meute, *Canis lupus familiaris* est un animal domestique dépendant de l'homme pour sa survie.



Date (en années de notre ère)

Cela paraissait définitif jusqu'à ce que François Valla, de l'Université de Nanterre, et des collègues israéliens découvrent des sépultures préneolithiques vieilles de 12 000 ans contenant des restes de chien (voir la figure 4). L'importance majeure de ce témoignage d'une vieille amitié a été amplifiée en 2011 par la découverte dans la grotte de Razboinichya, dans l'Altai (Sud de la Sibérie), d'un crâne de canidé. Son identification à l'issue d'analyses poussées sous la direction de Greg Hodgins, du Laboratoire de spectrométrie de masse de l'Université de l'Arizona, a montré qu'il s'agissait du crâne d'un chien domestique vieux de 33 000 ans. L'ancienneté de la domestication se trouvait ainsi presque triplée. En 2008, la paléontologue Mietje Germonpré, de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, et des collègues ont découvert dans les grottes de Goyet, en Belgique, des dents de loup percées pour être portées en collier, ainsi qu'un crâne plus large que celui d'un loup, vieux de 31 700 ans et proche de celui d'un chien husky... La même équipe a trouvé ensuite en République tchèque des crânes vieux de 26 000 ans avec, cette fois, un museau encore plus court et une boîte crânienne et un palais plus larges que ceux d'un loup. Entre les mâchoires de l'un de ces chiens avait été placé un os de mammoth, gibier emblématique de l'époque. Or ce genre de rite est encore pratiqué au sein de certaines peuplades sibériennes lorsqu'un homme est mort et qu'on l'envoie dans l'au-delà accompagné de son chien.

Entre chien et loup

Ce gigantesque saut dans le temps renouvelle ainsi l'histoire de la domestication, et par là celle de l'homme, puisque le chien serait notre compagnon depuis plus de 20 millénaires avant l'agriculture et l'élevage. L'histoire ne s'arrête peut-être pas là, car le séquençage de l'ADN permet de chiffrer non seulement les parentés, mais aussi l'ancienneté de la divergence entre deux branches d'un arbre généalogique. Par cette méthode génétique tout à fait indépendante des fouilles préhistoriques et des datations au carbone 14, on évalue la domestication du chien à quelque 100 000 ans...

Certains ont voulu placer en Chine le berceau du chien, mais des résultats récents remettent en question cette origine géographique unique. Quoi qu'il



4. LA SÉPULTURE D'AIN MALLAHA, dans la vallée du Jourdain au Nord du lac de Tibériade, est l'une des deux sépultures de Natoufiens suggérant l'existence d'une relation étroite entre humains et canidés. La culture de ces chasseurs-cueilleurs paléolithiques du Levant, qui ont expérimenté les premières sédentarisations, est attestée entre 10 800 et 8 200 avant notre ère. Découverte par François Valla, de l'Université de Nanterre, et des collègues israéliens, cette femme et un chiot (*près du crâne*) ont, d'après leur datation au radiocarbone, été enterrés ensemble il y a quelque 12 000 ans. Cela semble prouver l'existence d'une relation affective entre une femme et son chien, mais les archéologues n'excluent pas que le canidé ait été tué pour réaliser dans la sépulture un tableau à signification religieuse.

en soit, la domestication du loup et la création du chien par l'homme sont bien plus anciennes qu'on le croyait et fort antérieures au Néolithique, qu'elles ont précédé d'au moins 20 000 ans.

Le statut scientifique du chien et du loup semble clair, puisque les systématiciens attribuent généralement à chacun un nom d'espèce : *Canis domesticus* et *Canis lupus* respectivement. Pourtant, s'appuyant sur la faible distance génétique entre les deux animaux, la Société américaine de mammalogie considère le chien comme une sous-espèce du loup et le nomme *Canis lupus familiaris* (voir la figure 3). Cette interprétation est discutable, puisqu'il existe une trentaine de sous-espèces de loups, chacune dans sa zone géographique comme il est de règle à ce niveau taxinomique, mais la différence entre chien et loup n'est pas fondée sur la géographie... Certains spécialistes considèrent ainsi que le chien n'est que la forme domestique du loup et qu'il doit être rangé sous le même nom d'espèce, ce qui est tout à fait défendable, mais peu pratique pour faire la différence.

Ce débat académique amène à réfléchir sur le concept d'espèce qui, outre la ressemblance entre individus, a longtemps reposé sur le critère d'interfécondité. La situation était simple quand on croyait qu'il suffisait que le descendant soit stérile comme le bardot pour décider que ses parents, le cheval et l'ânesse, appartiennent à deux espèces différentes. On sait aujourd'hui que la réalité est plus complexe, que bien des espèces produisent des hybrides viables en captivité, mais ne se mélangent pas dans la nature et constituent de « bonnes » espèces. Or le chien et le loup sont interféconds ainsi que leurs descendants. En outre, les espèces du genre *Canis* séparées dans la nature, tels le loup, le chacal et le coyote, possèdent toutes 39 chromosomes et se croisent sans difficulté, avec une descendance fertile. D'un autre côté, bien des races de chiens, de tailles trop différentes, ne peuvent se croiser...

La définition biologique de l'espèce implique que des populations interfécondes soient isolées, par le comportement ou la génétique, des autres taxons (l'ensemble des organismes vivants partageant certains caractères) présents dans ce même lieu, tous constituant ainsi des espèces à part entière. Sa différenciation ne s'étant pas faite dans la nature, mais par l'action de l'homme et sans créer de barrière de

reproduction avec son ancêtre le loup, le chien a donc le statut qu'on veut bien lui donner. Bref, le meilleur ami de l'homme ne constitue peut-être pas une espèce au sens strict, comme tout animal domestique dont le statut n'est qu'affaire de convention.

Un processus mêlant sélection et adoption ?

Le chien est néanmoins très différent du loup, en ceci qu'il cohabite avec l'homme sans conflit. La domestication du loup n'a pas été seulement une sélection artificielle, mais aussi une éducation pour lui apprendre à vivre avec nous. Sans l'avoir recherché, j'ai été amené à élever un loup dans un appartement, ce qui est considéré comme impossible par les spécialistes. Mes connaissances en comportement animal ont sans doute joué un rôle essentiel pour rendre cela possible, mais bien moins que la compréhension intime de cet animal

redoutable que ma famille a acquise par l'expérience (voir l'encadré ci-dessous). C'est cela qui nous a permis de dominer psychologiquement notre loup sans entrer en conflit ouvert avec lui. Les gènes de cet animal, né en zoo et qui devait être euthanasié, étaient pourtant les mêmes que ceux d'un loup sauvage de Pologne.

Nos ancêtres ont nécessairement sélectionné le loup comme les zootechniciens le font toujours pour les animaux domestiques : en repérant les individus dotés des caractères souhaités, puis en favorisant leur reproduction (plus empiriquement sans doute, et sur de plus longues périodes de temps). Sans doute ont-ils éliminé les individus les plus agressifs et fait se reproduire ceux qui étaient les plus doux ; il en a été de même au début de la grande époque de la domestication, vers 8500 ans avant notre ère, quand nous sommes passés du sanglier au porc, du mouflon au mouton et de l'auroch à la vache.

Cette hypothèse a été testée à partir de 1957 par le généticien russe Dimitri Beliaev (1917-1985). Il a sélectionné 150 renards blancs sibériens en fonction de leur capacité à se familiariser avec l'homme. En trois générations, il a obtenu des renards nettement plus dociles et, en huit générations, des animaux qui recherchaient le contact avec les soigneurs. À la cinquantième génération, les renards étaient aussi soumis que des chiens, mais moins coopératifs et moins attachés à leur soigneur, ce qui était pourtant l'issue visée par Beliaev. L'expérience, qui a demandé le sacrifice de 5000 renards, se poursuit encore, mais cet échec à obéir aux ordres n'est pas surprenant, puisque la base génétique n'est pas la même que celle du chien : le renard, qui vit seul ou en couple, est en effet moins sociable dans la nature que le loup, lequel vit en meutes permanentes strictement hiérarchisées. La sélection de renards de plus en plus agressifs s'est aussi révélée

KAMALA, LOUVE ALTRUISTE

Kamala est le nom de la louve grise avec qui la famille de l'auteur a formé une meute dans les années 1970—une expérience aussi passionnante pour un écologue que dangereuse pour sa famille, car un loup, même apprivoisé, reste un fauve ne vivant pas volontiers en appartement... Voici deux anecdotes tirées de cette expérience hors normes.

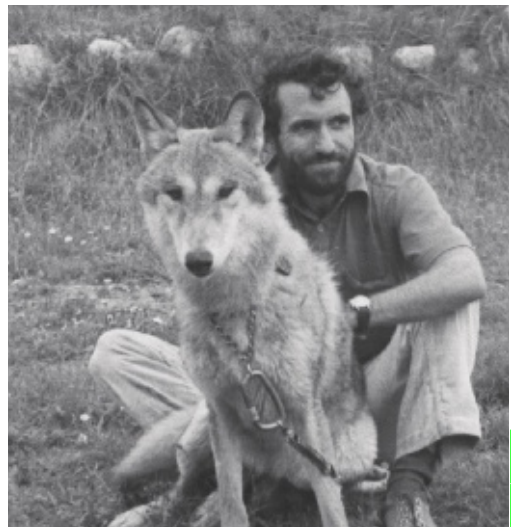
« Pour son dressage, nous sommes contents d'apprendre à Kamala à s'asseoir à la demande, à donner une patte, puis l'autre et à

se coucher. C'était très utile quand elle désirait quelque chose car, au lieu de s'agiter sans que l'on comprenne et de nous griffer le ventre ou la main, elle s'asseyait en face de nous et nous tendait la patte. Comme un chimpanzé auquel on a appris le langage par gestes des sourds-muets ou tout simplement un chien, elle n'a pas mis longtemps à généraliser l'usage de ce signal artificiel, de ce code nouveau de communication entre l'animal et nous. Elle s'asseyait donc devant les portes

fermées pour demander qu'on les lui ouvre et devant le lavabo pour qu'on lui donne à boire. (...) C'était le début de l'exploitation de l'homme non par l'homme, mais par le loup ! »

« Un jour d'été, nous sommes allés nous baigner dans l'Hérault près de Ganges et l'explication [du comportement étrange de Kamala] nous est apparue dans toute son évidence incroyable, éclairant d'un nouveau jour les faits précédents. Lorsque nous étions au milieu du courant, elle se jetait à l'eau et nous ramenait à la

rive après nous avoir saisi le poignet. N'encroyant pas nos yeux, nous avons recommencé dix fois ce manège et chaque fois Kamala venait à notre secours. Vers la fin, Kamala n'appréciait plus du tout ces sauvetages à répétition qui nous émerveillaient. Aussitôt qu'elle s'était secouée, il lui fallait replonger. Elle grognait après nous une fois sur la rive, sains et saufs, mais, poussée par son instinct de solidarité, elle ne pouvait s'empêcher de se rejeter à l'eau dès que nous repartions nous placer au milieu de la rivière. »



© AFP / L'Observateur

possible : les renardeaux produits par cette sélection restaient très farouches même s'ils avaient une mère amicale avec l'homme, ce qui montre que leur attitude résultait plus de leur sélection que de leur éducation, davantage de l'inné que de l'acquis.

Le patrimoine génétique du loup devenu chien a donc été modifié de génération en génération. Même si ce changement ne touche qu'une toute petite partie de l'ensemble des gènes, il nous paraît très grand, car les caractères qui nous importent le plus ont été supprimés ou amplifiés. Par exemple, l'homme a développé chez le chien adulte le comportement soumis que l'on observe chez le loup juvénile.

D'ailleurs, à le comparer à son ancêtre, on peut décrire le chien comme un éternel adolescent, ce qui permet à son maître de s'imposer comme le substitut incontesté du chef de meute. Ce trait majeur d'éternel adolescent pour la domestication est cependant très variable d'une race de chien à l'autre.

Il est difficile d'une manière générale de parler « du » chien, tant ses races sont différentes. Certaines – pour ne s'en tenir qu'au poids – sont jusqu'à 200 fois plus massives que d'autres. Certaines lignées sont connues pour leur dangerosité et d'autres pour leur docilité, l'éducation

modulant comme toujours ce trait héréditaire. Même s'il est possible d'éduquer un chien de combat pour qu'il n'attaque pas l'homme, il est plus facile de lui apprendre à se battre qu'à un chien d'une race qui n'a pas été sélectionnée dans ce but.

Contrairement à ce que l'on a longtemps défendu et que l'on croit encore sous une autre forme, il n'y a pas d'un côté les caractères innés et de l'autre les caractères acquis, d'un côté les animaux de pur instinct et de l'autre, nous, de pure intelligence. Il est clair aujourd'hui que, dans chaque espèce, il existe une part variable et inextricable de « nature » et de « culture » : les insectes

Le fait d'être parvenu à cohabiter et même à vivre en famille avec un fauve dangereux démontre la facilité avec laquelle nos ancêtres ont pu domestiquer le loup.

sont en grande partie programmés alors que l'homme est un être surtout culturel, tandis que le loup se situe entre les deux.

Toutefois, le loup est bien plus proche de nous que bien d'autres mammifères du fait de son immaturité de plusieurs années. Cette dernière permet en effet une éducation aux méthodes complexes

de chasse, lesquelles varient d'une meute à l'autre en fonction du gibier présent sur le territoire. Cet enseignement peut se transmettre en un même lieu pendant plusieurs dizaines d'années, donc sans que les loups de la première génération soient présents auprès de ceux de la dernière : il s'agit donc véritablement d'une sorte d'héritage culturel. Cela illustre la grande idée de Darwin selon laquelle il n'y a pas une différence de nature, mais de degré, entre l'homme et les autres espèces. On préfère pourtant parfois parler de « protoculture » et réserver le mot de « culture » à l'espèce humaine.

Si la domestication du loup ne peut qu'avoir résulté d'un processus de sélection, on ignore comment elle a débuté et s'est déroulée. Des individus affaiblis cherchant à survivre ou tout simplement curieux ont-ils appris à fréquenter des campements d'hommes préhistoriques pour profiter de leurs restes ? C'est l'hypothèse de la commensalité, qui trouve des arguments dans les pays où des chiens errants vivent de rapines et côtoient les humains sans vivre pour cela dans les maisons. En Italie, les loups sauvages fréquentent les décharges et le portrait de l'un d'entre eux, la gueule dégoulinante de spaghettis, a circulé sur Internet !

L'autre théorie est celle de l'adoption. Notre aventure d'élevage d'un loup dans un appartement ne fut pas seulement une expérience extrême. Le fait d'être parvenus à cohabiter et même à vivre en famille avec un fauve dangereux démontre la facilité avec laquelle nos ancêtres ont pu domestiquer le loup, puisqu'en plein air, ils disposaient de conditions plus favorables que dans un appartement moderne au deuxième étage... Cette expérience nous a montré qu'un loup intégré à une famille humaine la considère comme sa meute et en protège les membres (voir l'encadré page 47). Elle suggère que la capture de louveteaux a dû être réalisée plusieurs fois au cours de l'histoire de l'humanité (voir la figure 1), car leur intégration au sein de la horde humaine ne présente aucune difficulté : le loup ne connaissant pas son espèce, il s'assimile à ses compagnons de vie.

De fait, l'adoption d'animaux sauvages en bas âge au sein de peuples vivant au contact de la nature et même leur allaitement par des femmes ont été maintes



5. LES LOUVETEAUX sont le plus souvent gris-bruns et naissent aveugles au sein de portées de trois à sept petits. Allaités durant environ deux mois, ils ne sortent de la tanière qu'au bout de ce laps de temps, puis restent avec leurs parents environ un an, période où tous les membres de la meute les nourrissent, les soignent et les éduquent. Essentielle étant donnée l'éducation complexe aux mœurs sociales de leur meute, notamment de chasse, l'immaturité de plusieurs années du loup ressemble à celle de l'homme, eux aussi membres d'une espèce éminemment sociale. Ce trait commun a beaucoup facilité l'adoption de louveteaux au sein de groupes humains, ce qui a conduit à la création par l'homme de quelque 400 races de chiens.

fois observés par les ethnologues (voir la figure 6). Il m'est souvent arrivé, lorsque j'observais les singes mandrills en forêt équatoriale, d'arriver dans des villages où des animaux sauvages étaient gardés à proximité des cases et nourris comme animaux de compagnie.

Ces deux théories sont souvent opposées. Cependant, elles ne sont pas contradictoires et les deux scénarios de domestication ont pu se produire simultanément ou se succéder. Ces hypothèses, si elles ne sont pas exclusives, me paraissent cependant hiérarchisées : d'après mon expérience involontaire, la théorie de l'adoption permet une bien plus grande intimité que celle de la commensalité. Or la domestication du chien n'a pas conduit à un compagnonnage, mais bien à une véritable vie commune, d'abord pour chasser ensemble (les chiens servant de pisteurs et de rabatteurs) et pour protéger le campement, puis, bien plus tard, pour garder les troupeaux.

Un rôle possible dans l'évolution de l'homme

Cette longue vie commune avec le loup devenu chien a peut-être joué un rôle majeur dans l'évolution de l'homme. En 1973, l'Américain George Schaller, qui, avant d'aller étudier les grands félins, fut le premier à observer les gorilles dans la nature (avant Dian Fossey), a émis l'idée que nos ancêtres et les carnivores hautement sociaux tels que le loup ont occupé ensemble la même niche écologique de chasseurs en bandes coordonnées. Si *Homo sapiens* a changé de mode de vie depuis l'invention de l'agriculture et de l'élevage, il y a environ 10 000 ans, il a auparavant pratiqué un mode de vie de chasseurs-cueilleurs pendant 95 pour cent des quelque 200 000 ans écoulés depuis son apparition. Génétiquement, le chimpanzé commun et le bonobo sont sans conteste nos plus proches parents. Mais le loup serait l'animal le plus proche de l'homme tant sur le plan écologique que social.

On sait grâce aux Boschimans du Kalahari qu'un chasseur-cueilleur ramène trois fois plus de gibier s'il est accompagné de son chien. Si nos ancêtres possédaient des armes, un gros cerveau capable d'élaborer des stratégies de chasse et une communication efficace, ils n'étaient pas aussi aptes à la traque qu'un loup qui peut



6. FEMME PAPOUE ALLAITANT DES CHIOTS en Nouvelle-Guinée. L'auteur de la photographie, le journaliste Edmond Demaitre, en a fait don au Musée de l'homme dans les années 1930 en l'accompagnant de la légende : « Selon les sorciers, les animaux (chiens et porcs) nourris de cette façon ne quittent plus le village. Tabouri : côte méridionale. » Cet exemple ethnographique suggère comment, sans doute, les chasseurs préhistoriques ont lié des louveteaux à leur horde.



7. LE LOUP A AUSSI PRODUIT LE DINGO, un chien sauvage d'Australie (*Canis lupus dingo*) provenant d'une population de chiens domestiques aborigènes marrons, c'est-à-dire retournés à l'état sauvage. Ainsi, le loup a produit à partir du chien un autre canidé sauvage que lui-même.

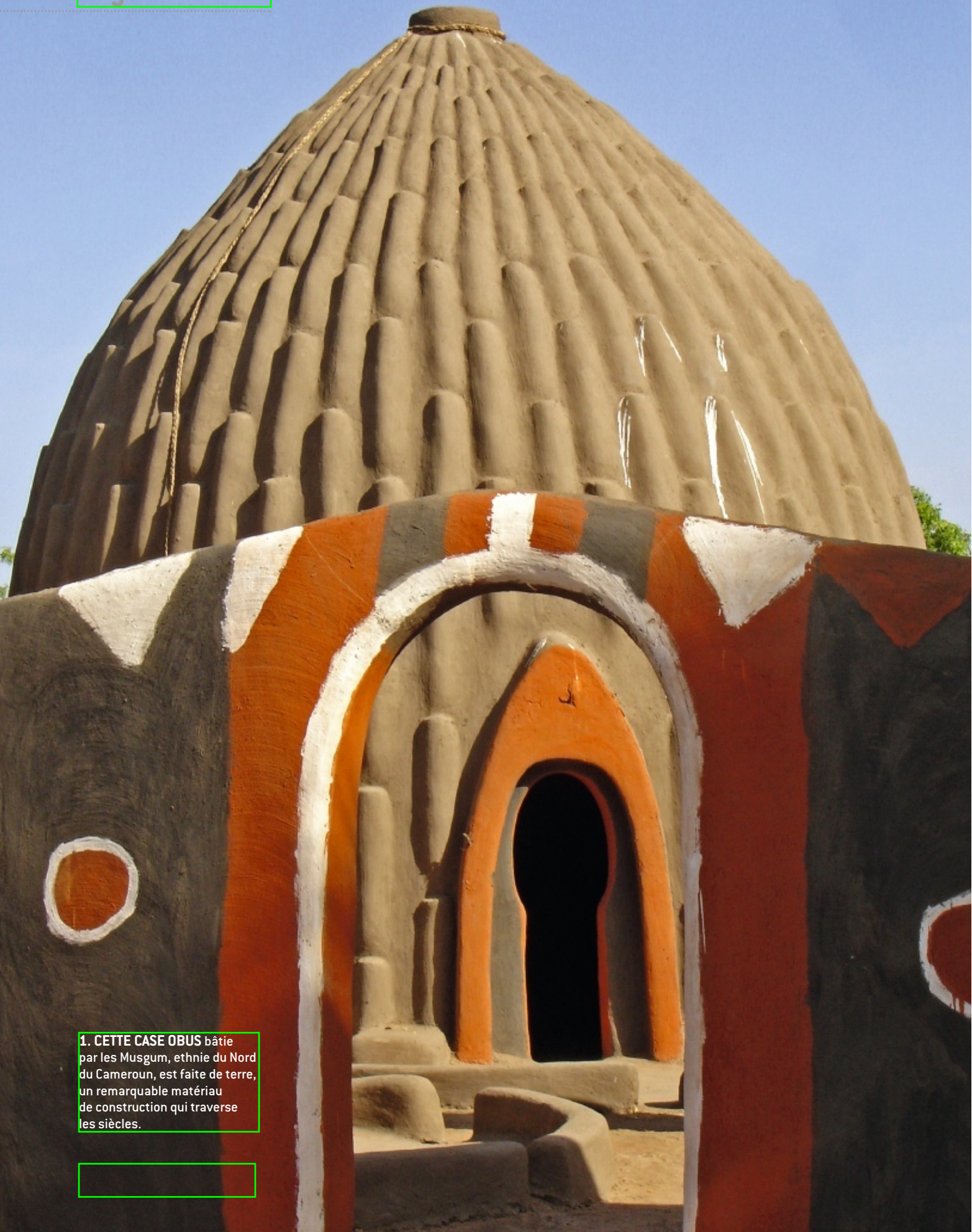
courir jusqu'à 50 kilomètres par heure et tenir longtemps ce rythme. Seule espèce de primate chassant régulièrement, les humains, cependant, ne voient guère dans la pénombre et ont une olfaction très limitée en comparaison des canidés. En socialisant le loup au sein de leur horde, les chasseurs-cueilleurs ont bénéficié de ces capacités et surpassé ainsi leurs concurrents. Du reste, ces derniers étaient peut-être des Néandertaliens, qui, d'après les données actuelles, n'ont jamais domestiqué le loup.

L'association entre hommes et loups apprivoisés a ainsi pu constituer un avantage adaptatif majeur pour les premiers. Ce point est à prendre en compte dans le débat récurrent sur les raisons de la disparition des Néandertaliens après l'arrivée en Eurasie des hommes anatomiquement modernes, il y a 35 000 à 30 000 ans, c'est-à-dire à l'époque des premiers indices connus de l'existence de chiens...

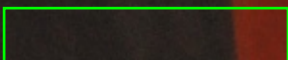
Dans le contexte de la séparation des tâches entre les sexes, caractéristique de notre espèce de... « chasseurs-cueilleuses », il est possible qu'une efficacité nettement accrue à la chasse ait pu contribuer à la prééminence démographique de *Homo sapiens* par rapport à *Homo neandertalensis*, prééminence établie il y a 30 000 ans, quand le chien nous accompagnait déjà depuis longtemps sans doute...

Ainsi, nous savons depuis peu que le loup, transformé en chien, est présent à nos côtés depuis quelques dizaines de milliers d'années d'évolution, époque-charnière de la mise en place de la civilisation. La prédation accrue rendue possible par cet animal a sans doute favorisé la démographie humaine ; mais avec la forte augmentation des prélèvements dans la nature, elle a aussi probablement poussé certains de nos ancêtres à se sédentariser en domestiquant non seulement des plantes qu'ils cueillaient, mais aussi des proies (vache, mouton, chèvre, cochon...).

La longue coévolution de l'homme et du loup avait auparavant modifié le plus vieil ami de l'homme dans le sens de lui faire accepter les ordres et les gestes de son maître (substitut du loup dominant), et par là d'augmenter sa capacité à communiquer avec nous. Au cours de ce processus, le plus vieil ami de l'homme a reçu une nouvelle mission, qu'il assure toujours aujourd'hui : surveiller les troupeaux et les rassembler pour les protéger des loups. ■



1. CETTE CASE OBUS bâtie par les Musgum, ethnie du Nord du Cameroun, est faite de terre, un remarquable matériau de construction qui traverse les siècles.



Le centre de Lyon est en partie bâti en terre ; plus d'un million d'habitations le sont en France, comme des centaines de millions dans le monde. La terre crue a toujours été l'un des tout premiers matériaux de construction de l'humanité. Elle le reste pour près de deux milliards d'êtres humains sur tous les continents, et elle ne sert pas qu'à construire de rudimentaires abris individuels : un bâtiment sur cinq du patrimoine de l'humanité inscrit à l'UNESCO est construit en terre.

Comment un matériau qui devient poussière s'il est trop sec, qui devient boue s'il est trop humide, peut-il servir à construire des édifices qui, comme les immeubles yéménites, dépassent dix étages, et qui, comme les murs d'enceinte de l'Alhambra ou de certaines portions de la Grande Muraille de Chine, traversent les siècles et les millénaires ? La réponse est à l'image du matériau lui-même : multiple.

tion partielle des minéraux initiaux et la formation de minéraux secondaires. La roche initiale se transforme ainsi petit à petit en une structure stratifiée faite de la superposition de différents « horizons ».

Brune, verte, grise, ocre, rouge ou blanche, la terre de chaque horizon révèle par sa couleur les grands traits de sa composition, tout particulièrement sa richesse en matières organiques et en oxydes de fer plus ou moins réduits. Grossière ou fine, la granulométrie – qui va des fractions les plus grossières, les cailloux (plus de deux centimètres), aux plus fines, les argiles (moins de deux micromètres), en passant par le gravier, le sable et le limon – révèle aussi son degré de transformation. Les fractions les plus grossières ne sont généralement que des fragments de roche-mère, tandis que les fractions les plus fines, les argiles, sont toujours des minéraux de transformation ayant incorporé à leur structure cristalline

La terre, un béton d'argile

Henri Van Damme

Pourquoi la terre constitue-t-elle un matériau de construction si universel et si robuste ? L'explication réside dans les forces capillaires qui font tenir les châteaux de sable et les forces électrostatiques s'exerçant au sein de l'argile.

À mi-chemin, sur le plan constructif, entre les châteaux de sable et les gratte-ciel, l'architecture de terre l'est aussi sur le plan scientifique. On sait désormais que la terre doit sa cohésion à des forces attractives qui relèvent soit de la physique des tas de sable, soit de celle du ciment. Nous verrons qu'elles sont tantôt capillaires, tantôt électrostatiques, mais requièrent dans tous les cas la présence d'argile et d'eau.

La terre est la matière du sol. Immobilisée ou au contraire mobilisable par les vents et les flots, cette précieuse couche résulte de l'altération des roches sous l'action des éléments et de la vie. Ce processus peut se limiter à une simple fragmentation de la roche-mère (arénisation), sans modification de la nature des minéraux, ou prendre la forme d'une transformation chimique impliquant, au sein d'un flux allant de la surface vers les profondeurs, la dissolu-

tion partielle des molécules d'eau : des groupes hydroxyles, OH^- .

Or ces argiles jouent un rôle capital. Sans elles, la terre ne serait pas adaptée à la construction. Ce sont elles qui, en enrobant totalement ou partiellement les autres grains, assurent leur liaison. Mais les proportions d'argiles, comme celles des autres populations de grains, varient fortement d'une terre à l'autre. Les populations humaines ont adapté la technique de construction – torchis, bauge, pisé, etc. – à la nature de la terre locale, sans jamais utiliser la couche la plus superficielle riche en matières organiques, bien trop utile à l'agriculture pour la consacrer à d'autres usages. C'est donc un peu plus en profondeur que le bâtisseur va chercher sa matière première. Le pisé (terre crue à coffrer), terre apte à être damée, contient une proportion importante de cailloux et de graviers. Les terres moins grossières, plus limoneuses,

L'ESSENTIEL

- La terre reste l'un des matériaux les plus utilisés pour construire des habitations.
- Les effets de capillarité, conjugués à la présence d'argile, lui confèrent une stabilité et une solidité considérables.
- Certaines argiles, électriquement chargées, jouent un rôle en tous points comparable à celui du ciment dans le béton.

© ANTHONY TASSEL/40 12/11 LES VINDS



sont plus collantes et davantage adaptées à la bauge (terre crue à empiler), au torchis (terre crue à remplir) ou à la fabrication d'adobes (briques de terre crue).

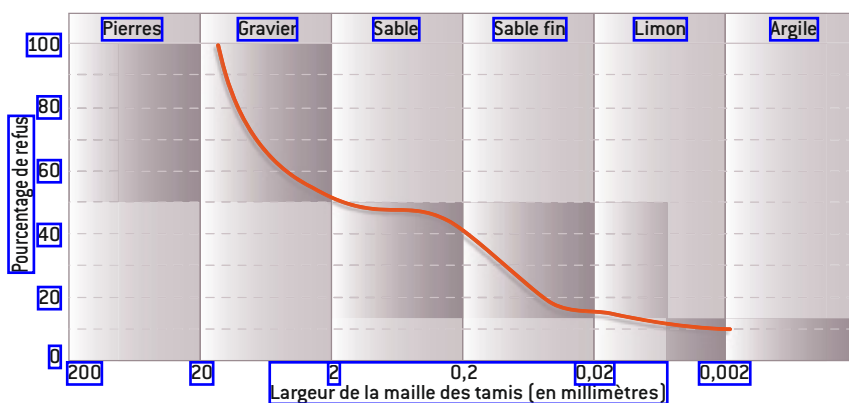
Formée de grains de tailles différentes dont une partie assure la cohésion globale, la terre, surtout sous forme de pisé, fait penser à un béton. En effet, qu'est-ce qu'un béton sinon un mélange de cailloux – de « granulats », en termes techniques – et d'une colle assurant la cohésion de l'ensemble ? Le béton ordinaire – le béton, que nous désignons ainsi sans même y réfléchir – est sans conteste le plus connu. Sa colle n'est autre que le ciment inventé au XIX^e siècle, que l'on dit « de Portland », car sa couleur rappelle celle des falaises de Portland en Grande-Bretagne. Toutefois, la terre aussi peut recevoir le label de « béton » : il faudrait juste préciser que l'on parle de « béton d'argile » plutôt que de « béton de ciment ».

Argiles : des mille-feuilles de silicates

On pourrait penser qu'à l'image de la variété de roches dont elle est issue, la fraction argileuse des sols n'est qu'un kaléidoscope : il n'en est rien. Les conditions dans lesquelles les argiles se forment – par altération à température modérée en présence d'eau – produisent une famille de minéraux ayant deux caractéristiques communes : ce sont des silicates (sels dérivant de la silice, SiO_2) ayant une structure cristalline en couches. En examinant les argiles au microscope, on peut trouver des formes variées (pétales de fleurs, plaquettes empilées, fibres enchevêtrées), mais qui ont toutes la caractéristique d'être plus larges et longues qu'épaisses (voir la figure 4).

Si l'on examine la structure de ces pétales, plaquettes ou fibres, on retrouve toujours une structure en couches formée de feuillets superposés. C'est pourquoi, dans la très vaste famille des silicates, les argiles sont classées dans la sous-famille des phyllosilicates (*phyllo* signifie feuille en grec). Cependant, tous les phyllosilicates ne sont pas des argiles. Certains, tels le talc ou les micas, sont de granulométrie souvent supérieure au seuil des deux micromètres qui définit les argiles.

Un grain d'argile est donc un mille-feuille, mais ce dernier est plus ou moins épais, avec des liaisons plus ou moins fortes entre feuillets. La brique élémentaire de



2. LA GRANULOMÉTRIE ET L'ASPECT DES TERRES sont très variables, comme l'indiquent ces exemples de gravier, sable, limon et argile. La première de ces propriétés peut être résumée par la courbe granulométrique, qui est le tracé du pourcentage de refus (pourcentage de matériau retenu par le tamis) en fonction de la largeur de maille du tamis. Cette largeur de maille indique la taille maximale des grains pouvant passer à travers le tamis. Par définition, les pierres ont un diamètre supérieur à 20 millimètres (deux centimètres), tandis que les grains d'argile ont au plus un diamètre de 0,002 millimètre (deux micromètres).

l'argile est le feuillet. Il s'agit d'un édifice de moins de un nanomètre d'épaisseur, composé de trois ou quatre plans d'anions (ions négatifs) tels que O^{2-} ou OH^- , entre lesquels s'insèrent de petits cations (ions positifs) principalement de silicium, d'aluminium et de magnésium. La charge nette du feuillet dépend des proportions d'anions et de cations.

Dans une importante famille d'argiles, les kaolinites, dont le feuillet est formé de trois plans négatifs, l'équilibre des anions et des cations est strictement respecté et le feuillet est donc électriquement neutre.

Les smectites, qui constituent une famille d'argiles à feuillet de quatre plans négatifs, présentent un déficit de charges positives; leur feuillet porte donc une charge nette négative, compensée par des cations supplémentaires, dits compensateurs, situés à la surface des feuillets et entourés de molécules d'eau.

Une troisième famille d'argiles, les illites, ressemble à celle des smectites, mais a deux caractéristiques particulières: d'une part, le déficit de charges positives y est très élevé et, d'autre part, il est systématiquement compensé par des cations de potassium, K^+ .

Les chlorites constituent une quatrième grande famille d'argiles, assez particulière, car leur structure de base est formée de deux feuillets alternés. Le premier est négatif comme dans les smectites. Le second est positif, de charge juste suffisante pour compenser la charge négative du premier, ce qui conduit à un assemblage neutre.

Le sable humide, un modèle

Kaolinites, smectites, illites et chlorites constituent l'essentiel des argiles que l'on trouve dans les sols. Ce sont elles dont il faut comprendre comment, avec de minuscules quantités d'eau, elles assurent la cohésion de ce béton d'argile qu'est la terre. Deux grandes situations se présentent: celle des argiles à structure élémentaire neutre (kaolinites, chlorites) et celle dont la structure de base porte une charge électrique (smectites, illites). Examinons ces deux situations, mais après avoir fait un bref retour en enfance...

Enfants, nous avons tous été de grands bâtisseurs en sable. Sans formation professionnelle aucune, nous avons facilement réussi à doser correctement le mélange de



3. LA TERRE EST UN BÉTON D'ARGILE, comme le suggère le rapprochement de ces deux images. Ainsi, dans le béton de ciment en usage aujourd'hui (*en haut*), graviers et petites pierres sont liés par une matrice de ciment, tandis que dans le béton d'argile utilisé autrefois (*en bas*), ils le sont par une matrice d'argile.

sable et d'eau et à assurer à ce mélange une cohésion optimale. En réalité, nous n'avons guère de mérite. Il résulte de la physique du sable humide que, sauf dans les états extrêmes de déshydratation ou d'hydratation, la cohésion d'un tel matériau est pratiquement indépendante de sa teneur en eau.

D'où vient cette cohésion, c'est-à-dire la force qui lie les grains humides les uns contre les autres? L'eau n'a pas la réputation d'être une colle particulièrement efficace, mais elle a une propriété que nous connaissons bien: elle mouille, autrement dit tend à s'étaler sur les surfaces. Ce liquide mouille bien le sable (ainsi que d'autres minéraux) grâce aux liaisons faibles que les molécules d'eau établissent avec la surface des grains de sable. Lorsqu'une goutte d'eau est posée entre deux grains de sable, elle tend donc à s'étaler sur les deux grains à la fois.

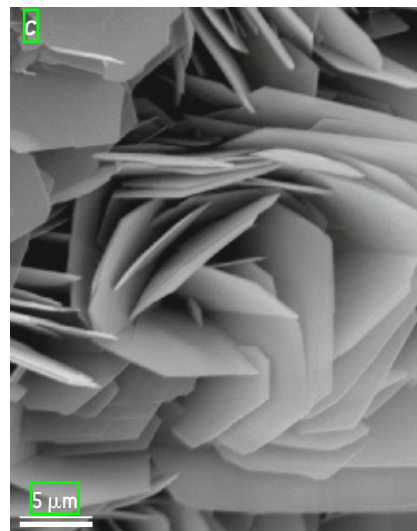
Mais cette tendance est contrecarrée par la cohésion de l'eau elle-même, liée à l'attraction mutuelle des molécules d'eau. Tout se passe comme si la surface de la goutte d'eau était une membrane élastique, qui empêche la goutte de s'étirer: c'est la tension superficielle, responsable des phénomènes de capillarité.

Pour notre goutte qui cherche à s'étaler mais qui en est empêchée, il en résulte un état d'équilibre, avec une forme caractéristique de diabolo: la goutte s'étire vers les deux grains de sorte que les liaisons entre molécules d'eau sont en tension (*voir l'encadré page 55*). En conséquence, la goutte se retrouve en dépression par rapport à l'air environnant.

C'est le physicien Pierre Simon de Laplace (1749-1827) qui, le premier, a pu établir la relation entre la dépression dans le pont liquide et la courbure du ménisque (la frontière entre l'eau et l'air). Son résultat est très simple: la dépression, dite de Laplace, est proportionnelle à la tension superficielle du liquide et à la courbure du ménisque.

Cette propriété disparaît cependant lorsqu'il y a soit beaucoup d'eau, soit très peu d'eau. Du côté très humide, il existe une limite évidente, atteinte lorsque l'eau est si abondante que les grains sont totalement noyés: à stade, il n'y a plus de ménisque ni aucune frontière air-eau accrochée aux grains, de sorte que la cohésion est perdue.

Du côté très sec, la limite est plus subtile. Elle est liée à la rugosité des grains



sées par des feuillets en cheveux, le déficit de charges positives est élevé, mais compensé par le fait que des ions potassium (K^+) sont en contact étroit avec la surface des feuillets entre lesquels ils sont insérés. En revanche, dans les kaolinites [b], l'équilibre des charges est parfait et les grains de ces argiles sont des empilements de quelques centaines de feuillets solidement soudés par des forces de van der Waals et des liaisons hydrogène. Quant aux chlorites [c], ce sont des assemblages alternés de feuillets positifs et négatifs ; ils sont électriquement neutres.

architecturales, sans qu'il soit besoin d'y ajouter les liants (plâtre, chaux ou ciment) dont nous avons désormais beaucoup de mal à nous passer ? En réalité, la physique du château de sable suffit dans de nombreux cas à expliquer de telles constructions, pourvu qu'on l'étende aux fractions fines de la terre que sont le limon et surtout les argiles.

Avec ses très petits grains (moins de deux micromètres, soit une taille plus de 50 fois inférieure à celle du sable le plus fin), l'argile est capable de démultiplier le nombre de ponts capillaires et d'engendrer des forces capillaires très intenses.

Avec David Gelard et des collègues du Laboratoire CRATerre de l'École nationale supérieure d'architecture de Grenoble, nous l'avons vérifié en préparant une brique de terre « modèle » à partir d'un mélange de sable et de boue de kaolinite (l'une des argiles décrites plus haut) que nous avons fait sécher dans un moule (sans cuire). Grâce au mélange, la boue enrobe les grains de sable. En séchant, se développent des forces capillaires qui rapprochent les plaquettes d'argile les unes des autres et les rapprochent des grains de sable.

Le procédé conduit ainsi à un matériau où les plaquettes d'argile forment non seulement une couche relativement compacte autour des grains de sable, mais aussi des ponts entre ces grains, comme dans les terres naturelles. Nous avons ensuite mesuré la cohésion de cette brique et l'avons comparée à ce que livre un calcul des forces capillaires par modélisation de cette terre. Étant donné la forme simple de ses grains et leur neutralité électrique, la kaolinite se prête bien à un tel calcul. Le résultat obtenu indique que l'essentiel de la cohésion de cette terre réside bien dans les effets capillaires.

De la capillarité même en climat aride

Ainsi, on comprend pourquoi la construction d'un château de sable humide est un jeu d'enfants. Mais qu'en est-il de la Grande Mosquée de Djenné (Mali), dont le matériau est rendu sec par le climat sahélien ? En réalité, aucun matériau sous forme de poudre ou sous forme de bloc poreux (même très peu poreux) n'est jamais totalement sec s'il est laissé à l'air. La capillarité en est, encore une fois, responsable. Les petits espaces qui séparent les grains sont en effet des lieux privilégiés de condensation de la vapeur d'eau sous forme de ponts

capillaires, grâce aux forces qui attirent les molécules d'eau sur la surface.

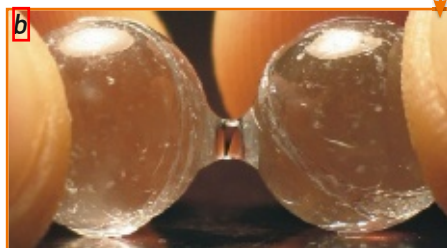
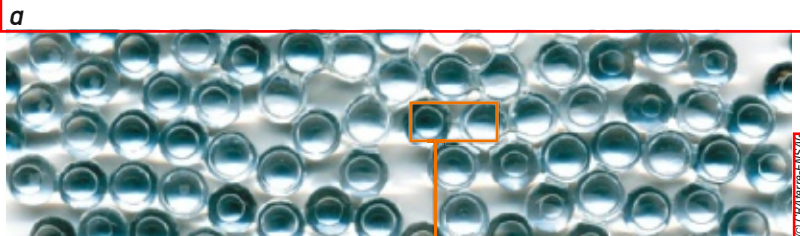
Lord Kelvin (1824-1907) a, le premier, montré que la condensation est d'autant plus précoce que l'espace est petit et que la courbure du ménisque qui se forme est grande. Pour une humidité relative de 90 pour cent (90 pour cent de la pression partielle maximale de vapeur d'eau dans l'air), l'eau se condense dans des espaces de quatre nanomètres ; elle se condense dans des espaces de deux nanomètres à 50 pour

cent d'humidité et dans des espaces de un nanomètre à 10 pour cent d'humidité.

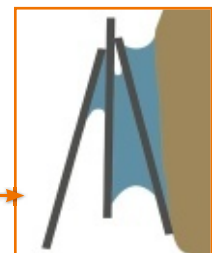
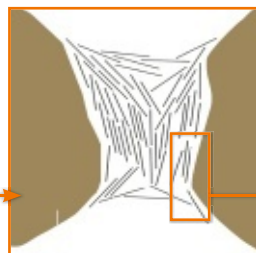
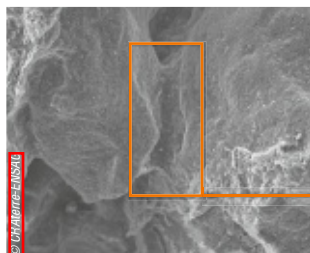
Ces ordres de grandeur sont certes petits, mais de tels micro-espaces foisonnent au sein des argiles. Point n'est donc besoin d'ajouter de l'eau liquide pour former des ponts capillaires dans une terre argileuse. Il suffit qu'il y ait de l'humidité dans l'air. Or c'est toujours le cas, même dans les climats les plus secs. Combien représente l'eau de condensation capillaire dans notre terre modèle ? Guère plus d'une cannette par

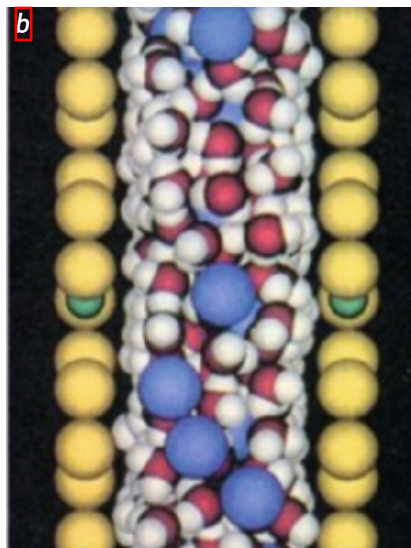
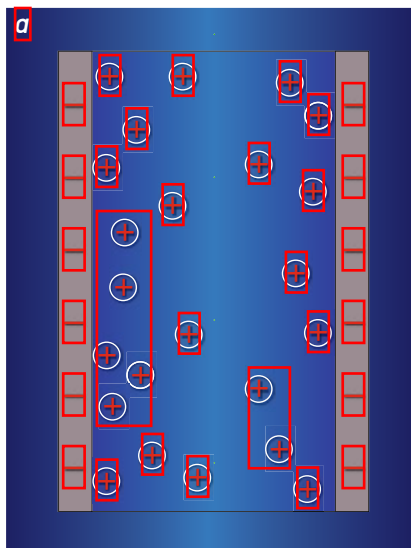
L'EAU, LIANT DE LA TERRE

Les châteaux de sable tiennent parce qu'ils contiennent de l'eau et de l'air. Lorsque la quantité d'eau est faible, elle se concentre aux points de contact entre grains en formant des ponts capillaires (a). La surface des grains étant hydrophile, l'eau tend à s'y étaler, ce qui donne à la frontière air-eau une forme concave (b) et met l'eau en tension. Cette tension se traduit par une dépression au sein du liquide, qui est à l'origine de l'attraction entre grains et de la cohésion du système. On pourrait croire qu'une quantité bien précise d'eau soit nécessaire pour obtenir cette cohésion, car trop d'eau pourrait rapidement noyer les grains et faire disparaître l'interface eau-air. En réalité, la cohésion reste constante sur une très grande plage de teneurs en eau. L'élargissement des ponts aqueux conduit, selon une loi géométrique simple (si les grains sont sphériques et tous de la même taille), à des formes plus complexes entre trois, quatre ou cinq grains, puis à des amas de « nids liquides » qui envahissent le système tout en maintenant constante la section, par grain, sur laquelle agit la dépression (c).



Dans la terre, cet effet est renforcé par l'argile, qui vient glisser partout des intercalaires feuilletés. Ces derniers multiplient les espaces étroits où se forment, même à très faible humidité, des ponts capillaires qui contribuent d'autant plus à la cohésion de l'ensemble qu'ils couvrent de grandes surfaces (voir ci-dessous). La présence éventuelle de charges électriques sur les feuillets d'argile et d'ions dans les ponts capillaires rend ces assemblages encore plus cohésifs (voir la figure 5).





5. LA STRUCTURE IONIQUE D'UN CIMENT D'ARGILE est un mille-feuille électrique, où alternent couches positives et couches négatives (*a*, schéma simplifié). Tandis que les feuillets minéraux (*b*, en jaune) portent des charges négatives, des ions positifs (en bleu) sont présents parmi les molécules d'eau (en rouge et blanc) qui séparent les feuillets. Les forces électrostatiques résultant de cette répartition confèrent à l'ensemble une cohésion d'autant plus forte que la charge des feuillets et des ions est élevée et que la mobilité des ions positifs est faible.

mètre cube de terre ! C'est très peu, mais assez pour construire un mur vertical de quelques mètres de hauteur, chose impossible avec du sable.

Une terre mêlée de kaolinite n'est cependant pas un matériau de construction extraordinaire. Elle ne suffirait pas, par exemple, aux maîtres bâtisseurs du Yémen, du Maroc ou du Mali, ni aux architectes qui font revivre la construction en terre crue dans nos régions. Des forces plus intenses que les forces capillaires peuvent donc être mobilisées dans d'autres terres. Lesquelles ?

Les forces dites de van der Waals sont les premières auxquelles on songe. Liées à la polarisation des nuages électroniques entourant les noyaux atomiques, ces forces sont universelles. Toujours présentes, elles agissent quasiment de manière égale entre tous les objets, et deviennent intenses si les objets considérés sont en contact direct. Mais le calcul montre que, dans une boue séchée, compte tenu du désordre des particules, elles sont d'intensité bien inférieure à celle des forces capillaires...

Il existe cependant d'autres argiles que la kaolinite, notamment les smectites, et les illites, dont les feuillets portent des charges électriques négatives. Ces charges provoquent une accumulation d'ions positifs dans l'eau de pontage située entre les grains d'argile. Compte tenu des signes opposés

de la charge des feuillets et de celle des ions, ces derniers sont attirés vers la surface des grains. Ils ne s'y collent pas pour autant car, tout comme les molécules d'eau qui les entourent, ils sont animés de mouvements erratiques dus à l'agitation thermique. Le résultat est un profil de concentration en cations qui est minimal au centre de l'espace entre les grains et qui augmente à mesure que l'on s'approche de la surface de ces derniers (voir la figure 5).

Cette situation conduit à un bilan de forces soit répulsif, soit attractif. Cela dépend de la compétition entre deux contributions. La première est celle des interactions électrostatiques de toutes les charges portées par les grains et les ions. On l'obtient en sommant toutes les interactions : ion-ion (répulsive, car les charges sont de même signe), ion-grain (attractive) et grain-grain (répulsive). Le résultat est toujours attractif, comme l'est le bilan des interactions entre ions dans un cristal.

La seconde contribution, répulsive, est liée au fait que les ions sont mobiles et se comportent comme un gaz. Elle crée une pression qualifiée d'osmotique, proportionnelle à la concentration moyenne des objets mobiles (les cations, en l'occurrence) au milieu de l'espace entre grains.

BIBLIOGRAPHIE

D. Gelard et al., *Le rôle de l'eau dans la cohésion et l'adhésion du matériau terre*, Terra 2008, (sous la dir. de L. Rainer et al.), The Getty Conservation Institute, Los Angeles, pp. 266-270, 2011.

L. Fontaine et R. Anger, *Bâtir en terre*, Belin, 2010.

H. Van Damme, *Matériaux de construction et développement durable*, dans *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science* (coord. D. Wilgenbus et D. Pol), Le Pommier, 2009.

R. Pellenq et H. Van Damme, *Why does concrete set ?*, *Materials Research Society Bulletin*, vol. 29, pp. 319-323, 2004.

Des cations plus attirants

Le bilan des deux contributions dépend fortement de la charge des ions. Doubler la charge des cations – par exemple passer du sodium, Na^+ , au calcium, Ca^{2+} – réduit de moitié le nombre d'ions nécessaires pour assurer la neutralité, mais, ce faisant, on réduit aussi de moitié le nombre d'objets mobiles et on réduit d'autant la pression répulsive. Dans le même temps, l'attraction électrostatique devient plus forte, principalement grâce aux fluctuations de la position des ions. Grâce à l'agitation thermique, ceux-ci peuvent en effet s'accumuler temporairement d'un côté ou de l'autre de l'espace qui sépare les deux grains d'argile. Ces configurations qui s'écartent de la moyenne sont particulièrement attractives et elles le sont d'autant plus que les charges des ions positifs et des grains d'argile sont élevées.

Comme souvent, la pratique ou le savoir-faire traditionnel a précédé la théorie. Les agriculteurs savent depuis des lustres qu'il faut chauler un champ (c'est-à-dire lui apporter des ions calcium) pour renforcer

la solidité des mottes de terre et éviter que les pluies battantes n'entraînent le sol par ruissellement. En tout cas, le calcul montre que la cohésion d'une smectite calcique peut être dix fois supérieure à sa cohésion par capillarité. Ce qui autorise d'audacieux projets architecturaux !

La terre est donc un béton à ciment d'argile, mais l'analogie entre argile et ciment ne s'arrête pas au fait qu'ils jouent tous deux un rôle de colle. Elle touche aussi leur genèse, leur structure, et le mécanisme par lequel ils collent. Obtenue par calcination d'un mélange de calcaire et d'argile à 1450 °C, le ciment peut en quelque sorte être considéré comme une roche volcanique artificielle. Il est très majoritairement constitué de silicates de calcium. Lors de son gâchage (son mélange avec l'eau), il se produit une série de réactions étonnamment proches de celles qui, à partir d'une roche-mère, conduisent aux argiles. Au contact de l'eau, les minéraux du ciment commencent à se dissoudre.

La concentration en ions silicate et ions calcium augmentant, la concentration en

ions atteint bientôt un niveau suffisant pour que de nouveaux minéraux se forment et se déposent (« précipitent ») sur ce qui reste des minéraux initiaux. Ces nouveaux minéraux, formés de grains extrêmement petits, de taille nanométrique, sont nommés hydrates, car, comme les argiles, ils ont incorporé des éléments de molécules d'eau – des groupes hydroxyles, OH^- , dans leur structure. Ce sont eux, les objets minéraux les plus microscopiques du béton, qui en assurent la cohésion.

Le ciment, une superargile

L'analogie avec les argiles va encore plus loin. Comme les argiles, les hydrates de silicate de calcium ont une structure en lamelles et les forces qui assurent leur cohésion sont, comme dans les argiles portant une charge électrique, des forces électrostatiques, mais d'une vigueur centuple. Cette extraordinaire démultiplication, qui permet de concevoir des gratte-ciel hauts de plusieurs centaines de mètres, le ciment

doit à la charge électrique très élevée portée par les hydrates et au fait que les ions calcium ont perdu leur mobilité, ce qui élimine toute répulsion entre (nano) grains. La danse des ions calcium dans une couche d'eau est remplacée par une scène figée, comme s'il s'agissait d'une mince couche de verre.

Avec sept milliards d'individus, l'humanité a plus que jamais besoin de logements. Pour nos travaux d'aménagement – routes, remblais, ponts, tunnels, digues, ports et aéroports –, nous déplaçons désormais plus de terre que l'érosion naturelle n'en transporte. Nous sommes devenus les principaux sculpteurs de notre planète. Comprendre les mécanismes de cohésion qui sont à l'œuvre dans le matériau terre peut nous aider à résoudre le problème du logement à l'échelle globale, à conserver l'énorme patrimoine architectural que nous ont laissé des générations de bâtisseurs, à mieux utiliser les sols en place pour nos aménagements et, enfin, à nous protéger des aléas naturels. C'est une recherche d'avenir ! ■



france culture

LA MARCHÉ DES SCIENCES

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

Aurélie Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

en partenariat avec **SCIENCE**

Le premier de notre genre ?

Kate Wong

Les étonnants fossiles de *Australopithecus sediba*, une nouvelle espèce d'australopithèques sud-africains, nourrissent le débat sur l'origine du genre humain et son lieu d'apparition.

Où s'enracine le genre humain ? En Afrique, on en est certain. Mais où ? Lee Berger a découvert en Afrique du Sud un indice clef qui pourrait nous l'indiquer : un nouveau genre d'australopithèques présentant plusieurs caractères humains. Un ancêtre du genre humain, *Homo* ? C'est ce que pense ce paléanthropologue américain de l'Université du Witwatersrand à Johannesburg, puisqu'il l'a nommé *Australopithecus sediba*, « l'australopithèque source » (en sésotho, l'une des 11 langues officielles d'Afrique du Sud, *sediba* signifie source).

Quoi qu'il en soit, depuis que L. Berger a publié sa découverte en 2010, les paléanthropologues du monde entier défilent chez lui pour examiner ses fossiles, et en restent bouche bée. Il faut dire qu'ils sont plutôt habitués à se contenter d'une dent ou d'une mandibule, alors que L. Berger a retrouvé les squelettes partiels de deux individus de la même espèce...

D'après l'équipe de L. Berger, le mélange unique de traits australopithèques et humains qui caractérise *Au. sediba* fait de lui la plus ancienne espèce humaine

connue. Rappelons qu'il y a entre trois millions et deux millions d'années, des australopithèques ont acquis les caractères humains. Les australopithèques ont évolué dans les régions forestières ou boisées d'Afrique où, durant plus d'un million d'années avant l'apparition des premières espèces humaines, ils ne nous ont guère ressemblé. Ainsi, Lucy et ses congénères australopithèques des Afars (*Australopithecus afarensis*) avaient des jambes courtes, des mains faites pour grimper aux arbres et un cerveau de petite taille similaire à celui de leurs ancêtres simiens.

Des australopithèques aux humains

Ensuite, quand le climat a changé de sorte que les savanes se sont étendues, ont été sélectionnées des lignées d'australopithèques dotés de longues jambes, de mains de plus en plus aptes à la fabrication d'outils et d'un cerveau de grande taille. Le genre *Homo*, qui allait dominer la planète, était apparu.

Afin de comprendre l'origine de ce succès évolutif, les paléanthropologues

L'ESSENTIEL

■ Le genre humain, *Homo*, était censé être issu de l'évolution en Afrique de l'Est de *Australopithecus afarensis*, dont fait partie l'individu Lucy.

■ L'Américain

Lee Berger a découvert une nouvelle espèce d'australopithèques présentant plusieurs traits humains, qui vivaient en Afrique du Sud il y a deux millions d'années.

■ Il y voit un ancêtre

du genre humain, ce qui conférerait à ce dernier une origine australe. Mais la thèse de L. Berger est controversée.

Grand Suroccident Images



ratissent depuis longtemps l'Afrique à la recherche de fossiles des premières espèces humaines. Parce que les plus anciens de ces fossiles ont été découverts en Afrique de l'Est, s'est dégagée l'impression que l'évolution cruciale à l'origine du rameau humain s'est déroulée dans cette région. C'est là qu'un nouveau mode de vie inventé par les espèces préhumaines aurait conduit nos ancêtres à consommer de plus en plus de viande pour s'adapter à un environnement où les fruits se raréfiaient. Ce nouveau régime alimentaire, très énergétique et riche en nutriments, aurait puissamment concouru à l'émergence des traits spécifiquement humains, particulièrement un cerveau volumineux.

Cette théorie, la mieux acceptée parmi les paléanthropologues, repose toutefois sur des indices qui peuvent être considérés comme ténus : le plus souvent, les trouvailles de fossiles datant de plus de deux millions d'années se limitent ici à une mâchoire, là à une poignée de dents... En outre, ces vestiges appartiennent soit à des ancêtres australopithèques des premières espèces humaines, soit à des espèces humaines si postérieures à l'émergence du rameau humain qu'elles ne peuvent nous renseigner sur l'ordre d'apparition des traits distinctifs du corps humain, ni sur les conditions de leur évolution. Il manquait donc des fossiles humains de plus de deux millions d'années et bien conservés. Or c'est en Afrique du Sud que l'équipe de L. Berger en a trouvé !

La grotte de Malapa, une caverne d'Ali Baba

Les fossiles d'homininés étant extrêmement rares, L. Berger ne s'attendait pas à une découverte de l'importance de *Australopithecus sediba*. Certes, il n'excluait pas que le genre *Homo* puisse être originaire d'Afrique du Sud et non d'Afrique de l'Est comme le veut le consensus scientifique actuel, mais il ne pensait pas qu'il le serait de la région qu'il étudie, à une cinquantaine de kilomètres au Nord-Ouest de Johannesburg. Pourtant, depuis qu'en 1999 l'UNESCO l'a placée dans la liste du patrimoine mondial après la découverte d'un grand nombre de

1. AUSTRALOPITHECUS SEDIBA, une espèce d'australopithèque découverte en Afrique du Sud, est considéré par certains paléanthropologues comme un ancêtre de *Homo*, le genre humain.

fossiles d'anciens hominidés, cette région porte l'appellation prédestinée de «Berceau de l'humanité»... Cependant, pour cette raison précisément, elle est aussi l'une des plus explorées par les paléanthropologues. C'est pourquoi L. Berger a, des années durant, continué à fouiller la grotte Gladysvale au sein de la réserve naturelle John Nash. Parmi les millions de fossiles animaux présents, il ne trouvait guère que quelques traces de l'espèce *Australopithecus africanus*. Il s'est alors donné comme objectif supplémentaire de dater son site. En Afrique de l'Est, les fossiles sont extraits de sédiments encastrés entre des couches de cendres volcaniques que l'on sait dater avec fiabilité. Or le Berceau de l'humanité, en Afrique du Sud, est dépourvu de cendres volcaniques.

Les méthodes inventées pour contourner cette difficulté font notamment appel aux inversions du champ magnétique terrestre enregistré dans les strates de roches aimantables. Elles se sont vite révélées utiles. En août 2008, au bout d'une piste créée au XIX^e siècle par les carriers qui approvisionnaient Johannesburg en blocs calcaires, L. Berger découvre une cavité créée à la dynamite et mesurant trois mètres sur quatre. Les quelques fossiles animaux qu'il aperçoit lui donnent envie de revenir sur ce site, qu'il nomme Malapa,

« propriété » en langue sésoto. En le revisitant 15 jours plus tard, il découvre un fragment de clavicule d'un hominidé. En quelques mois, son équipe met au jour plus de 220 ossements de *Au. sediba*, soit plus que la totalité des ossements de toutes premières espèces du genre *Homo* jamais trouvés. Or, par les techniques de datation mises au point à Gladysvale, les géologues de son équipe montrent que ces restes datent de 1,977 million d'années, à 2 000 ans près !

Bras long, doigts courts et droits

L'importance des fossiles trouvés à Malapa tient au fait qu'ils comportent un grand nombre d'éléments du squelette. On peut ainsi espérer que l'on pourra en tirer des conclusions sur l'ordre d'apparition des traits caractéristiques du genre *Homo*. Il est déjà clair en tout cas que les caractères humains ne se sont pas tous développés en même temps comme on le pensait. Le bassin australopithèque, étroit et allongé, a par exemple évolué pour prendre une forme en coupe facilitant le passage de la grosse tête des bébés humains.

Or on constate que le bassin de *Au. sediba* est de type humain, tandis que le volume de son cerveau (420 centimètres

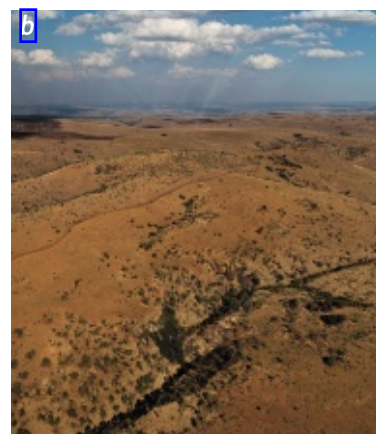
cubes) représente moins d'un tiers de celui du cerveau humain (1 400 centimètres cubes). La présence simultanée chez *Au. sediba* d'un bassin en coupe et d'un petit cerveau montre que, dans la lignée de *Au. sediba*, ce n'est pas l'augmentation de la taille du cerveau qui a déclenché la métamorphose du bassin.

Le même genre d'observations peut se faire à des échelles biologiques plus petites : la boîte crânienne du jeune mâle montre que son cerveau, bien que petit, est pourvu d'un front élargi, ce qui indique un début de réorganisation de la substance grise. Survivance du passé arboricole de ses ancêtres, les membres supérieurs de la femelle adulte sont longs et prolongés de doigts courts et droits qui devaient rendre sa main habile, mais la présence de fortes insertions musculaires sur les os du poignet signale en même temps une poigne digne de celle d'un singe...

Autre exemple : Bernard Zipfel, de l'Université du Witwatersrand et membre de l'équipe de Malapa, souligne que le pied de *Au. sediba* est composé d'un talon de singe archaïque, mais d'un os de cheville quasi humain. Ainsi, la juxtaposition de traits anciens (australopithèques) et nouveaux (humains) dans le squelette de *Au. sediba* paraît parfois si improbable que des paléontologues ignorent que ses os ont

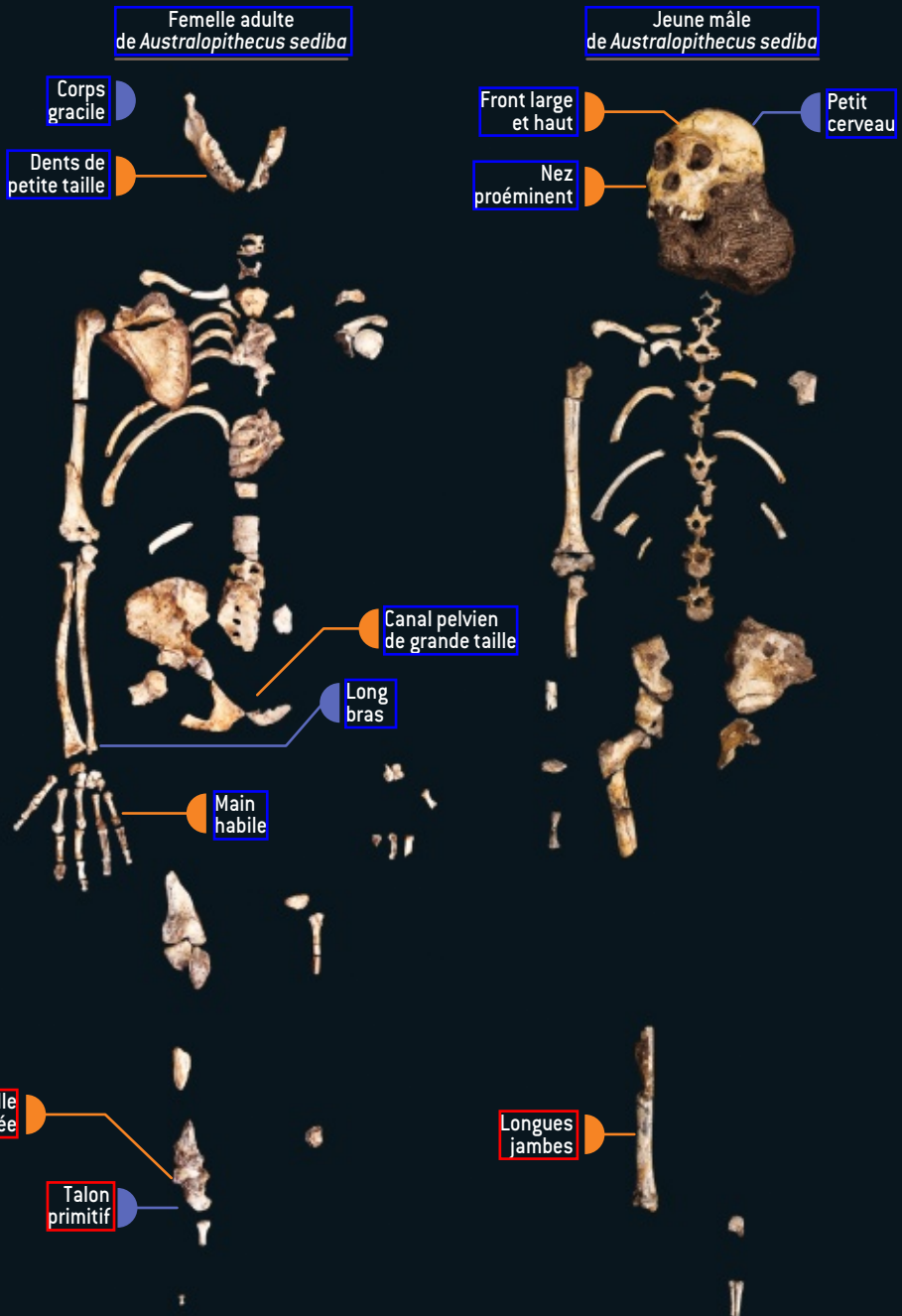


2. LEE BERGER ET SON ÉQUIPE n'ont pas fini d'explorer la grotte de Malapa, où a été découvert *Australopithecus sediba* [a]. Des blocs calcifiés dégagés il y a longtemps par des carriers [c] seront examinés au scanner à rayons X, dans l'espoir d'y découvrir des fossiles. La région de Malapa fait partie d'une zone surnommée Berceau de l'humanité, en raison de sa richesse en fossiles d'hominidés [b].



LES CARACTÈRES HÉTÉROCLITES DE *AUSTRALOPITHECUS SEDIBA*

Les squelettes de *Au. sediba* présentent un mélange inattendu de traits propres aux australopithèques et au genre *Homo*. On pensait que les traits caractéristiques du genre humain, tels que des bras courts et des mains agiles, sont apparus simultanément. Or *Au. sediba* montre qu'ils sont apparus en plusieurs étapes. Ainsi, ses longs bras, faits pour grimper aux arbres, sont assortis de mains au long pouce et aux doigts courts, qui semblent conférer une préhension fine, comme celle d'un humain moderne. Pour l'équipe de Lee Berger, ce mélange de traits australopithèques et humains suggère que *Au. sediba* descend de l'australopithèque africain, *Au. africanus*, ou d'une lignée inconnue, et qu'il est un ancêtre direct de *Homo erectus*.



Homologue au genre *Australopithecus*

Homologue au genre *Homo*

Cheville évoluée

Talon primitif

Homo erectus

Australopithecus africanus

Australopithecus sediba



été retrouvés en connexion les auraient sans doute attribués à des espèces différentes...

Une telle mosaïque de caractères anciens et nouveaux est une bonne leçon pour les paléontologues, souligne L. Berger. Lui aussi aurait attribué les os de *Au. sediba* à des espèces distinctes s'il les avait trouvés séparés : son bassin lui aurait évoqué, par exemple, celui d'un *Homo erectus*; son bras aurait été associé à un singe, et sa cheville à un *Homo sapiens*... Selon L. Berger, on ne peut qu'en conclure qu'il n'est plus possible d'attribuer un os isolé à un genre, par exemple au genre *Homo*. Il vise particulièrement par là une mâchoire supérieure trouvée dans l'Hadar, en Éthiopie, qui passe aujourd'hui pour la plus ancienne trace humaine, puisqu'elle est datée de 2,3 millions d'années.

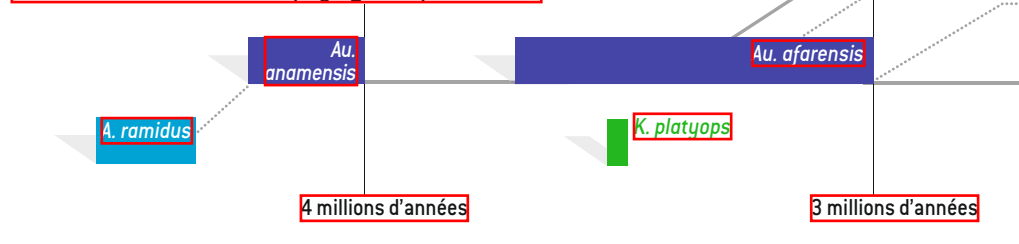
De fait, si l'on exclut cette mâchoire du registre fossile humain, *Au. sediba* est plus ancien que les plus vieux fossiles du genre *Homo* correctement datés, tout en étant plus récent que *Au. afarensis*, l'espèce à laquelle appartient Lucy. *Au. sediba* pourrait donc être l'ancêtre immédiat de la lignée des *Homo*. Pour L. Berger et ses collègues, ses caractères évolués le positionnent plus précisément en tant qu'ancêtre de *Homo erectus*. Ainsi, au lieu du scénario dominant suivant lequel *Au. afarensis* aurait évolué en *Homo habilis*, qui aurait ensuite évolué en *Homo erectus*, pour L. Berger, ce serait plutôt l'australopithèque africain (*Au. africanus*) qui serait l'ancêtre de *Au. sediba*, lequel aurait ensuite évolué en *Homo erectus*.

Si ce scénario est le bon, *H. habilis* ne serait plus notre ancêtre, mais seulement un rameau de l'arbre phylogénétique du genre *Homo*. Les australopithèques des Afars (*Au. afarensis*) censés être à l'origine de tous les hominins plus récents, dont *Au. africanus*, seraient même mis de côté. À l'appui de sa thèse, L. Berger insiste sur le fait que le talon de *Au. sediba* paraît moins évolué que celui de *Au. afarensis*; cela implique soit que sa lignée est passée par une réversion évolutive vers un talon plus primitif, soit que cet australopithèque ne fait pas partie de la lignée de *Au. afarensis*, ni de celle de *Au. africanus*, mais d'une lignée qui reste à découvrir...

William Kimbel, de l'Université d'Arizona, à la tête de l'équipe ayant découvert la mâchoire supérieure vieille de 2,3 millions d'années de l'Hadar, n'est pas impressionné par cet argumentaire.

Selon le schéma communément admis, *Australopithecus afarensis* serait l'ancêtre de *Homo habilis*, qui serait lui-même l'ancêtre de *H. erectus* et des espèces ultérieures du genre humain.

Mais certains traits de *Au. sediba* – dont son talon plus primitif que celui de *Au. afarensis* et sa main plus humaine en apparence que celle de *H. habilis* – ont nourri l'hypothèse controversée selon laquelle *Au. sediba* serait en fait l'ancêtre de *H. erectus*, et que *Au. afarensis* et *H. habilis* ne seraient que des rameaux latéraux de l'arbre phylogénétique humain.



Il considère que l'idée qu'il faudrait un squelette avant de pouvoir classer un spécimen n'a pas de sens en paléontologie. Pour lui, l'essentiel est de disposer d'un fragment présentant des caractéristiques suffisantes pour un diagnostic, ce qui est bien le cas s'agissant de la mâchoire de l'Hadar. Ainsi, la disposition parabolique des dents sur cette mâchoire est indubitablement un trait humain.

W. Kimbel a vu les fossiles de Malapa, mais n'a pas eu l'occasion de les étudier en détail ; il trouve intrigants leurs caractères quasi humains et ne sait trop qu'en penser. Quoi qu'il en soit, il raille l'idée que la lignée de *Au. sediba* serait à l'origine de celle de *H. erectus*. Comment un taxon sud-africain doté de quelques traits humains pourrait-il être l'ancêtre du genre humain, alors qu'une lignée nettement humaine était déjà présente 300 000 ans auparavant dans les Afars ?

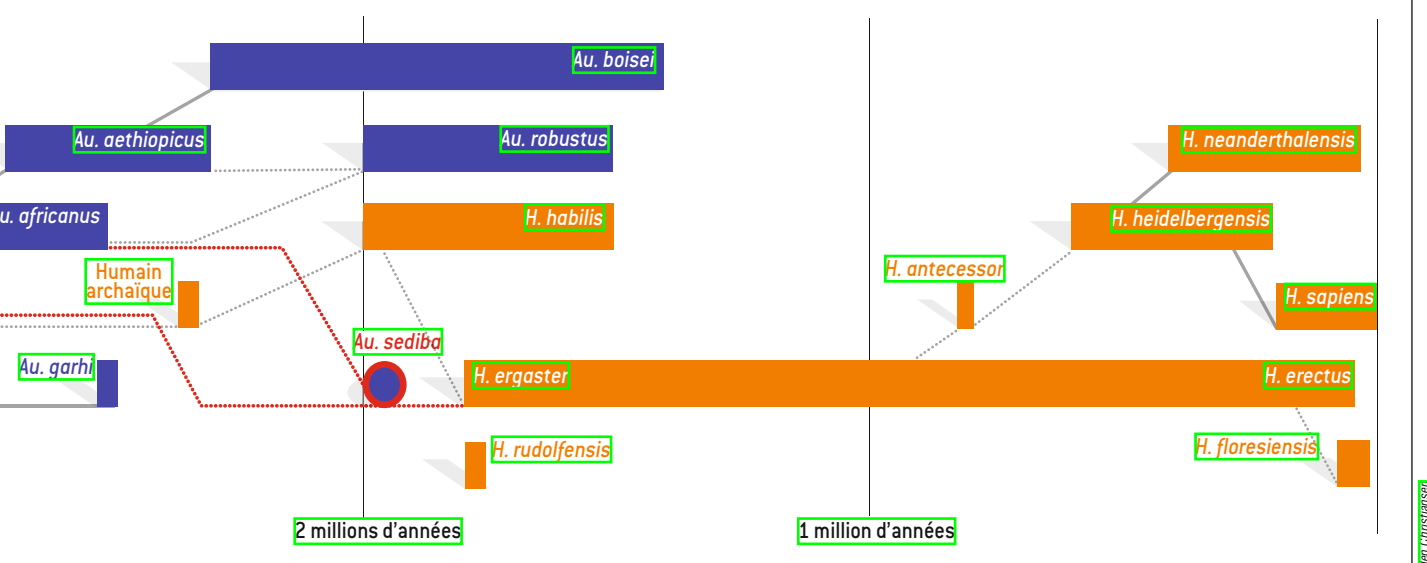
***Australopithecus sediba* : un statut controversé**

Pour sa part, Meave Leakey, de l'Institut du bassin du lac Turkana au Kenya, estime que, s'agissant de *Au. sediba*, trop de points sont en contradiction, tout particulièrement sa datation et sa localisation. Les recherches de M. Leakey portent aussi sur les fossiles est-africains, et elle fait partie des chercheurs qui pensent plus probable que les hominins d'Afrique du Sud appartiennent à un rameau évolutif local.

D'après René Bobe, de l'Université George Washington, il aurait fallu que les restes de *Au. sediba* soient plus anciens – antérieurs à 2,5 millions d'années au moins – pour qu'il puisse être un ancêtre plausible du genre *Homo*. Son âge étant de 1,977 million d'années, sa forme semble dans l'ensemble trop primitive pour qu'il puisse être considéré comme un ancêtre des hominins fossiles de la région du lac de Turkana au Kenya. Ces derniers, qui sont un petit peu plus récents, présenteraient bien plus de caractères incontestables du genre *Homo*. À cela, L. Berger réplique que l'espèce *Au. sediba* existait probablement longtemps avant la fossilisation des individus de Malapa. Mais, souligne R. Bobe et d'autres, rien ne permet de l'affirmer... « Les paléanthropologues tendent à considérer que les fossiles qu'ils découvrent occupent une position clef dans l'arbre phylogénétique des hominins, souligne-t-il. Or d'un point de vue statistique, il y a peu de chances que ce soit le cas : quand une population occupe toute l'Afrique, où elle évolue de façon complexe, pourquoi est-ce justement l'hominin que vous trouvez qui en est l'ancêtre ? »

L. Berger est cependant soutenu par Bernard Wood, de l'Université de Washington, dans son opinion qu'un ossement isolé ne suffit pas pour tirer une conclusion quant au corps entier de l'animal. En revanche, lui non plus ne souscrit pas à l'idée que *Au. sediba* puisse être l'ancêtre du genre

NOTRE ANCÊTRE À TOUS ?



Homo. Cet australopithèque présente trop peu de traits permettant de l'associer au genre *Homo*, estime-t-il, et il est possible qu'il les ait développés indépendamment de la lignée humaine. Du reste, selon lui, *Au. sediba* a un trop grand chemin évolutif à parcourir pour se muer en *Homo erectus*.

En fait, la question de la place de *Au. sediba* dans notre arbre phylogénétique est obscurcie par l'absence d'une définition claire du genre *Homo*. En établir une est une tâche plus ardue qu'il n'y paraît, étant donné le faible nombre de fossiles humains datant de la transition entre les australopithèques et les premiers hommes, d'autant que beaucoup ne sont que des fragments... Dès lors, identifier avec certitude les caractéristiques qui ont fait de nos ancêtres des humains à part entière est un défi. Les squelettes de Malapa illustrent cette difficulté : ils sont tellement plus complets que tout spécimen antérieur de *Homo* qu'il est très difficile de les comparer avec d'autres restes.

Quelle que soit la position phylogénétique des fossiles de Malapa, ils sont censés nous fournir le portrait le plus précis que nous puissions nous faire de l'une des premières espèces d'homininés, notamment parce que nous disposons de deux individus. En plus du jeune mâle et de la femelle adulte – les deux spécimens les plus complets –, l'équipe de L. Berger a mis au jour des ossements de quatre autres individus, dont un bébé, ce qui est

très rare. Leur état de conservation est excellent. Les chercheurs ont ainsi obtenu une omoplate mince comme du papier à cigarette, une première côte pareille à une lamelle, des os de doigt de la taille d'un petit pois, des vertèbres dont les apophyses épineuses sont intactes...

Avant Malapa, les paléanthropologues ne disposaient d'aucun os complet de bras d'homininés primitif. Les dimensions de membres utilisées pour reconstituer

SI LA PRÉSENCE DE MATÉRIAUX organiques se confirme, elle permettra peut-être aussi d'obtenir de l'ADN de *Australopithecus sediba*.

des comportements essentiels tels que la locomotion ne sont donc que des estimations. Même pour Lucy, le squelette d'homininés d'âge comparable le plus complet, découverte en 1974, de nombreuses parties des os des membres supérieurs et inférieurs sont manquantes. En revanche, chez la femelle adulte de Malapa, le bras est pratiquement intact, de l'omoplate jusqu'à la main. Seules les extrémités de certains doigts et quelques os du poignet sont absents, mais L. Berger espère les retrouver ainsi que les restes des deux autres squelettes lorsqu'il fouillera le sol.

Jusqu'ici, en effet, son équipe n'a fait que collecter les ossements accessibles en surface. Une fois en possession de ces éléments, les chercheurs pourront notamment

reconstituer comment *Au. sediba* grandissait et se déplaçait ; ils pourront aussi étudier la diversité régnant au sein de cette espèce.

Le site de Malapa a aussi livré ce qui pourrait être de la matière organique fossilisée. L. Berger a remarqué, sur les images de tomographie aux rayons X du crâne du jeune mâle, ce qui ressemble à une petite poche d'air entre la surface du fossile et le contour de l'os. En examinant cet endroit au microscope, il a noté sur la surface un motif caractéristique rappelant la structure de la peau. Si cela se confirme, cette peau préservée pourrait révéler la couleur de peau de *Au. sediba* ainsi que la densité et l'aspect de ses poils.

Ces éléments livreraient aussi la répartition des glandes sudoripares, et nous renseigneraient ainsi sur la régulation thermique de *Au. sediba*. Les glandes sudoripares donnent aussi des indices sur l'évolution du cerveau puisque, étant donné la sensibilité à la chaleur de cet organe, une température assez basse est une condition préalable à l'émergence d'un gros cerveau.

Si la présence de ces matériaux organiques se confirme, pourra-t-on aussi obtenir de l'ADN ? Le plus ancien ADN d'homininés que l'on ait récupéré jusqu'ici, celui d'un Néandertalien, date d'il y a environ 100 000 ans. L. Berger espère que dans les conditions de conservation exceptionnelles de Malapa, des informations génétiques pourront être recueillies. Si c'est le cas, les chercheurs pourront peut-être en déduire

si la femelle adulte et le jeune mâle étaient mère et fils, comme cela a déjà été évoqué, et, dans la mesure du possible, leurs relations avec les autres hominins du site. Pareille percée vers la génétique inciterait aussi les chercheurs à tenter de trouver de l'ADN dans d'autres sites, ce qui, avec de la chance, permettrait de trancher la question des liens de parenté entre les diverses espèces d'hominins.

La découverte de restes organiques exploitables serait une si grande première en paléontologie des hominins, que l'équipe de Malapa sait bien que les preuves de la percée devront être irréfutables. Jusqu'ici,

les résultats des analyses vont dans le sens souhaité par L. Berger, et la découverte de restes de matière organique sur des fossiles de dinosaures, bien plus anciens, conforte son espoir d'une percée comparable en paléanthropologie. Après tout, suggère-t-il, la conservation d'éléments organiques sur des fossiles d'hominins est peut-être quelque chose d'assez fréquent, mais que personne jusqu'ici n'avait estimé possible.

Le tartre dentaire est un autre détail que personne n'a jamais songé à étudier sur un hominins de cet âge. De sombres taches brunes apparaissent en effet à la surface des molaires du jeune mâle. Quand

on prépare des fossiles d'hominins afin qu'ils puissent être étudiés, on décape en général les dents. Toutefois, il se pourrait que les taches en question soient du même genre que celles contre lesquelles nous luttons à la brosse à dents ou en allant chez le dentiste, suggère L. Berger.

Le régime alimentaire révélé par le tartre

Dans ce cas, ce tartre ancien permettrait d'avoir un aperçu sur le régime alimentaire des hominins. Jusqu'à présent, une telle étude passait par la mesure des dif-

Ramification, variabilité et mosaïque : la difficile histoire de la lignée humaine

La découverte de plusieurs hominins dans le site de Malapa est un extraordinaire résultat scientifique. Trouver des restes humains de cette période est déjà un événement rare, mais en trouver plusieurs d'un même individu l'est encore plus. Or Malapa a livré les restes de plusieurs individus, dont deux représentés par plusieurs éléments... L'étude de ces squelettes partiels produira donc beaucoup de données, mais rendra aussi le diagnostic taxinomique, c'est-à-dire la caractérisation de l'espèce considérée, bien plus complexe que dans le cas d'un ossement isolé. La mise au jour par l'équipe de L. Berger en Afrique du Sud des vestiges d'*Australopithecus sediba* est donc une avancée majeure de nos connaissances sur un groupe d'hominins austral datant de près de deux millions d'années.

Pour autant, leur position chronologique à l'aube (supposée) de la naissance des *Homo erectus* est-elle crédible? Les caractéristiques morphologiques de *Au. sediba* sont très particulières : elles sont en partie proches de celles du genre *Australopithecus* et en partie proches de celles du genre *Homo*. Assez pour avancer l'hypothèse que l'origine de *H. erectus* se situerait au sein de cette lignée d'australopitèques sud-africains?

Cela sera très difficile à démontrer. Tout d'abord, il n'y a aucun consensus scientifique sur ce qu'est un *H. erectus*, pas plus qu'il n'y en a sur ce qui a défini les premiers *Homo*; ensuite, avant d'oser proposer la modification des arbres phylogénétiques

à cette période cruciale de l'histoire de l'humanité (l'homme va quitter son berceau africain pour partir à la conquête de l'Eurasie), il est obligatoire d'appréhender d'abord quelle variabilité biologique existait parmi les hominins de cette époque. Or la façon dont les traits biologiques varient au sein d'une espèce ou d'un genre est extrêmement difficile à cerner. On a naturellement tendance à l'assimiler à celle de l'unique spécimen que l'on étudie (c'est humain!), mais l'histoire de la taxinomie nous oblige à ne pas ignorer que cette façon de faire conduit le plus souvent à des interprétations fausses.

Évolution en mosaïque

Il importe en outre de ne pas oublier que l'évolution de la lignée humaine ne s'est pas déroulée de façon linéaire. Pour des périodes plus récentes (au Pléistocène moyen et supérieur), il a été montré que certains traits pouvaient évoluer, sur un même territoire, en mosaïque. Cela signifie qu'ils n'apparaissent pas forcément de façon synchrone au sein des différents groupes humains appartenant à une lignée définie par le partage de caractères ancestraux.

Avant de savoir quelle valeur phylogénique peut avoir tel ou tel caractère ou telle ou telle combinaison de traits, il faut donc essayer de connaître leur variabilité chez les prédécesseurs et les successeurs de la lignée étudiée... C'est seulement ainsi que l'on a une chance de déterminer de façon fiable si des ca-

ractéristiques ont un intérêt interprétatif réel en phylogénie.

Cette dure réalité paléontologique implique qu'en paléanthropologie, il n'y a le plus souvent pas de certitudes, mais seulement des hypothèses. En principe, un chercheur ne les présente à ses pairs que parce qu'il estime qu'elles sont associées au plus faible risque de se tromper. Sinon, les seules certitudes sont les faits archéologiques (la découverte d'objets, de fossiles, d'empreintes, etc.), mais la crédibilité qu'il convient de leur accorder varie en fonction de la façon dont on les considère, de la nature des échantillons de comparaison (souvent très criticables), de la résolution chronologique, des hypothèses à la mode, etc.

Soulignons aussi que l'on ne fouille pas un site seulement pour un fossile, mais que c'est l'ensemble de ce qu'un gisement est capable de nous apprendre en termes de connaissances sédimentologiques, paléo-environnementales, chronologiques, taphonomiques (relatives à la fossilisation), sur l'évolution des espèces animales (ou végétales) du passé, leurs comportements, leurs interactions, qui fait l'objet de recherches scientifiques interdisciplinaires. Si l'on néglige un point, on fragilise les résultats de tous les autres champs disciplinaires. Pourtant et malheureusement, le caractère sensationnel de la découverte de fossiles humains a l'étrange conséquence d'éclipser les résultats des autres disciplines.

Certes, la découverte de ces fossiles humains étant si rare, leur médiatisation mobilise l'intérêt de la société, ce qui facilite l'obtention par les chercheurs des moyens nécessaires à la recherche. C'est une bonne chose tant les recherches de terrain sont complexes, coûteuses et ingrates, donc difficiles à valoriser. Mais cette nécessaire mise en lumière des résultats obtenus ne remplace pas le long et ardu travail d'analyse paléanthropologique, lequel ne se fait qu'avec le temps et en impliquant tous les chercheurs concernés.

Malheureusement, en paléanthropologie, l'auteur d'une découverte et l'objet de l'étude tendent à se confondre un peu, ce qui offre à tant de découvreurs l'occasion de proposer leur vision de nos origines... Or tant qu'une telle découverte n'a pas été étudiée à fond par les chercheurs, une telle vision risque de n'être qu'une contribution de plus à la construction d'une mythologie scientifique.

Pour nous, tel est le cas de la vision intéressante, mais prématurée, de l'origine du genre *Homo* proposée par Lee Berger. Comme Marcel Otte, préhistorien de l'Université de Liège, le rappelait en 2010 dans son article *Rêve, science et religion* : « Le scientifique ne sait rien, il cherche, il doute [...] et n'échange qu'avec ses pairs, là où sa parole peut être opportunément contredite. »

Bruno Maureille
Laboratoire PACEA,
CNRS et Université de Bordeaux 1

férents isotopes du carbone présents dans les dents. Les résultats indiquent si un animal s'est nourri au cours de sa vie de plantes « en C₃ » (arbres, arbustes, etc.) ou en « C₄ » (graminées, laïches, etc.) – ou, dans le cas des espèces carnivores, d'animaux qui ont eux-mêmes ingurgité de telles plantes – ou d'un mélange des deux... Il s'agit d'informations indirectes et peu précises. En revanche, des restes des aliments ingérés s'incorporent directement au tartre. Il s'agit notamment de petits cristaux de silice nommés phytolithes, que toutes les plantes fabriquent, certains phytolithes ayant des formes caractéristiques de l'espèce. Leur étude peut ainsi révéler avec précision quelles sortes de plantes avait mangé l'animal peu avant sa mort.

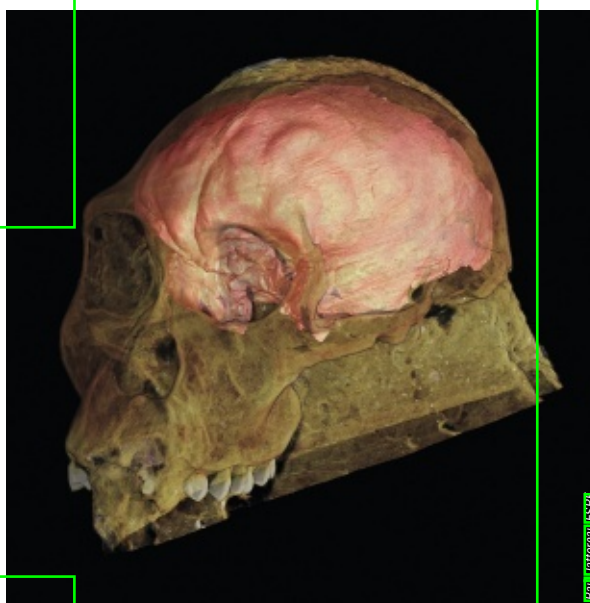
En se fondant à la fois sur l'analyse des proportions de radio-isotopes du carbone, sur les phytolithes et sur les marques d'usure dentaire caractéristiques de la dureté des aliments mastiqués dans les mois ayant précédé la mort, l'équipe de L. Berger a récemment obtenu et publié des informations sur le régime alimentaire de *Au. sediba*.

En octobre 2011, dans un article publié par *Science*, Peter Ungar de l'Université d'Arkansas et Matt Sponheimer de l'Université du Colorado soulignaient la diversité et la complexité insoupçonnées du régime alimentaire de nos aïeux. Alors que l'ardipithèque (*Ardipithecus ramidus*), l'un des tout premiers hominins présumés (il y a 4,4 millions d'années), se nourrissait essentiellement de plantes en C₃ comme les chimpanzés, d'autres hominins africains anciens semblent s'être nourris d'un mélange de plantes en C₃ et en C₄. Le paranthrope robuste (*Paranthropus robustus*) avait même adopté un régime alimentaire presque exclusivement constitué de plantes en C₄, comme l'ont montré Thure Cerling, de l'Université de l'Utah, et ses collègues.

Pour sa part, l'équipe de Malapa a établi que les deux individus *Au. sediba* consommaient presque exclusivement des plantes en C₃. Ce régime alimentaire, semblable à ceux des chimpanzés de savane, diffère notablement de ceux établis à ce

L'AUTEUR

Kate WONG est journaliste scientifique à *Scientific American*.



3. LA TOMOGRAPHIE À RAYONS X ISSUS D'UN SYNCHROTRON a livré une mesure précise des cavités endocrâniennes de *Au. sediba*, dont on a tiré une reconstruction de la forme de son cerveau (en rose). Même si le cerveau de ce jeune mâle de *Au. sediba* n'est guère plus gros que celui d'un chimpanzé, la reconstruction suggère que dans la lignée de *Au. sediba*, commençait une réorganisation du lobe frontal, partie du cerveau jouant chez l'homme un rôle essentiel dans la planification et le langage.

BIBLIOGRAPHIE

A. G. Henry et al., The diet of *Australopithecus sediba*, *Nature*, vol. 487, pp. 90-93, 2012.

R. Pickering et al., *Australopithecus sediba* at 1.977 Ma and implications for the origins of the genus *Homo*, *Science*, vol. 333, pp. 1421-1423, 2011. [Ce même numéro de *Science* contient une série d'articles sur *Au. sediba*.]

L. R. Berger et al., *Australopithecus sediba* : A new species of Homo-like Australopithecus from South Africa, *Science*, vol. 328, pp. 195-204, 2010.

jour pour les autres hominins. Bien que l'échantillon disponible soit très restreint (deux individus), cette étude confirme que les régimes des australopithèques étaient diversifiés, à l'instar des morphologies des espèces du même genre.

Comment les australopithèques de Malapa sont-ils morts ? L. Berger soupçonne qu'ils ont été piégés en cherchant de l'eau. La grotte de Malapa d'aujourd'hui constitue en effet le fond d'un ancien lac souterrain, qui se trouvait 30 à 50 mètres sous le sol.

Attirés dans l'à-pic par la présence d'eau, les australopithèques de Malapa y seraient tombés, ce qui expliquerait que leurs restes sont exempts de toute trace de charognage. On peut supposer que le jeune mâle est tombé en premier dans le gouffre, ce qui y aurait attiré la femelle adulte, sa mère peut-être. Quoi qu'il en soit, la grotte de Malapa était un véritable piège à fossiles, puisque toute une ménagerie allant des antilopes aux zèbres semble y avoir connu le même sort, avant d'être fossilisés comme les hominins.

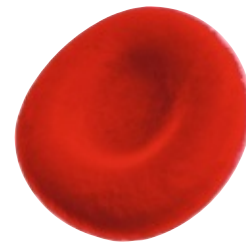
L'étude ne fait que commencer

L'étude de *Au. sediba* ne fait que commencer, et l'exploration de la grotte de Malapa n'est pas achevée non plus. Elle pourrait contenir encore de nombreux ossements fossiles. Du reste, quand L. Berger descend dans la cavité, il peut indiquer du doigt des endroits où affleurent ici l'os du bras d'un enfant, ailleurs la mâchoire inférieure d'une sorte de félin à dents de sabre, etc. Pour le moment, l'équipe a amassé l'un des plus grands trésors paléontologiques jamais trouvés en se contentant de ramasser les blocs séparés par les carriers du XIX^e siècle (voir la figure 2) et en les passant au tomographe à rayons X. Une fois que les fouilles systématiques des 500 mètres carrés du site auront commencé, il est probable que d'autres fossiles seront mis au jour. Le site de Malapa est si riche que L. Berger pourrait sans doute y consacrer le reste de sa carrière, mais la curiosité le pousse à explorer d'autres régions africaines ayant les mêmes caractéristiques que le Berceau de l'humanité. Y trouvera-t-on de nouveaux ancêtres ? ■

Les porphyrines : les couleurs de la vie

Franck Dayan et Emilie Dayan

Des pigments biologiques, les porphyrines, sont des molécules essentielles du vivant. Leur étude nourrit des domaines aussi variés que la médecine, l'agronomie ou le photovoltaïque.



Dans l'Antiquité, les Grecs récoltaient des coquillages de la famille des murex, dont ils extrayaient un pigment de couleur pourpre qu'ils utilisaient pour teindre les tissus. Aujourd'hui, le terme grec *porphureos*, qui signifie pourpre, a donné son nom à la classe de pigments la plus abondante dans la nature, les porphyrines. Produites tant chez les animaux que chez les végétaux, et même chez certaines bactéries, ces molécules en forme d'anneau entrent dans la composition d'éléments essentiels à la vie.

Liées à un ion magnésium, les porphyrines végétales forment la chlorophylle, indispensable à la photosynthèse. Combinées à un ion fer, les porphyrines animales forment l'hème, un motif nécessaire à la fonction de nombreuses métalloprotéines : l'hème de l'hémoglobine des globules rouges assure le transport de l'oxygène et du dioxyde de carbone dans le sang, et c'est encore l'hème d'autres protéines qui soutient les chaînes de transport d'électrons dans la respiration cellulaire (la production d'énergie dans les cellules) ou qui contribue aux activités catalytiques de nom-

L'ESSENTIEL

■ **Les porphyrines sont une famille de molécules présentes chez la plupart des organismes vivants et essentielles à la vie.**

■ **Leur voie de synthèse est très semblable d'un règne du vivant à un autre.**

■ **Chez l'homme, des anomalies au cours de leur synthèse, dues à des mutations génétiques, entraînent des maladies rares, les porphyries.**

■ **Chez les végétaux, les porphyrines sont des précurseurs de la chlorophylle. Certains herbicides agissent en perturbant leur synthèse.**

© Shutterstock.com / J. P. Dayan

breuses enzymes. Associées au nickel, les porphyrines forment la coenzyme F_{430} qui joue un rôle majeur chez les bactéries métabolisant le méthane. Enfin, la vitamine B_{12} , produite par des micro-organismes (bactéries, champignons, algues), résulte de la combinaison du cobalt avec un dérivé des porphyrines.

Toutes ces molécules issues des porphyrines, nommées métalloporphyrines, sont construites sur le même schéma : un anneau – la porphyrine – au sein duquel est niché un ion métallique. Chacune est un pigment : elle absorbe la lumière visible, ce qui donne une couleur aux cellules qui en contiennent (vert pour la chlorophylle, rouge pour l'hémoglobine, jaune pour la coenzyme F_{430} , rouge pourpre pour la vitamine B_{12}). De par leur rôle clé chez presque tous les organismes vivants, on les surnomme parfois les couleurs de la vie.

Leur universalité en fait l'objet de nombreuses recherches dans des domaines aussi variés que la médecine, l'agriculture ou les énergies renouvelables. Chez l'homme, des anomalies dans la synthèse des porphyrines entraînent de graves pathologies, les porphyries. Leur étude vise à mieux diagnostiquer

et traiter ces maladies génétiques. Chez les végétaux, les agronomes ont développé des herbicides qui tuent les plantes nuisibles en perturbant la synthèse des porphyrines. D'autres travaux utilisant les propriétés phototoniques des porphyrines ont pour objectif la mise au point de photothérapies ou de cellules photovoltaïques.

Les porphyries, maladies génétiques

Les porphyries et les herbicides mettent en jeu un même principe : la perturbation de la voie de synthèse des porphyrines. Celle-ci est très semblable d'un règne du vivant à un autre, ce qui montre qu'elle s'est établie tôt dans l'évolution. Les porphyrines forment un anneau dit tétrapyrrolique (de formule brute $C_{20}H_{14}N_4$), assemblé à partir de précurseurs au cours d'une voie de biosynthèse qui comprend plusieurs étapes. Les premiers précurseurs des porphyrines diffèrent entre les végétaux et les animaux, mais ils convergent vers la formation d'un composé commun à tous les règnes du vivant, l'acide δ -aminolévulinique ou ALA. Les étapes ultérieures sont universelles (voir la figure 2). La dernière étape commune est catalysée par l'enzyme protoporphyrinogène oxydase, aussi nommée PROTOgène oxydase. Elle aboutit à la formation de la protoporphyrine.

C'est au cœur de cette porphyrine qu'est ensuite inséré un ion métallique, qui lui confère sa fonction biologique (voir l'encadré page 69). Cette ultime étape est propre à chaque fonction : une enzyme spécifique catalyse la liaison des ions métalliques

(fer, magnésium, cobalt ou nickel) à la protoporphyrine et conduit à la formation de l'hème, de la chlorophylle, de la vitamine B_{12} ou du cofacteur F_{430} .

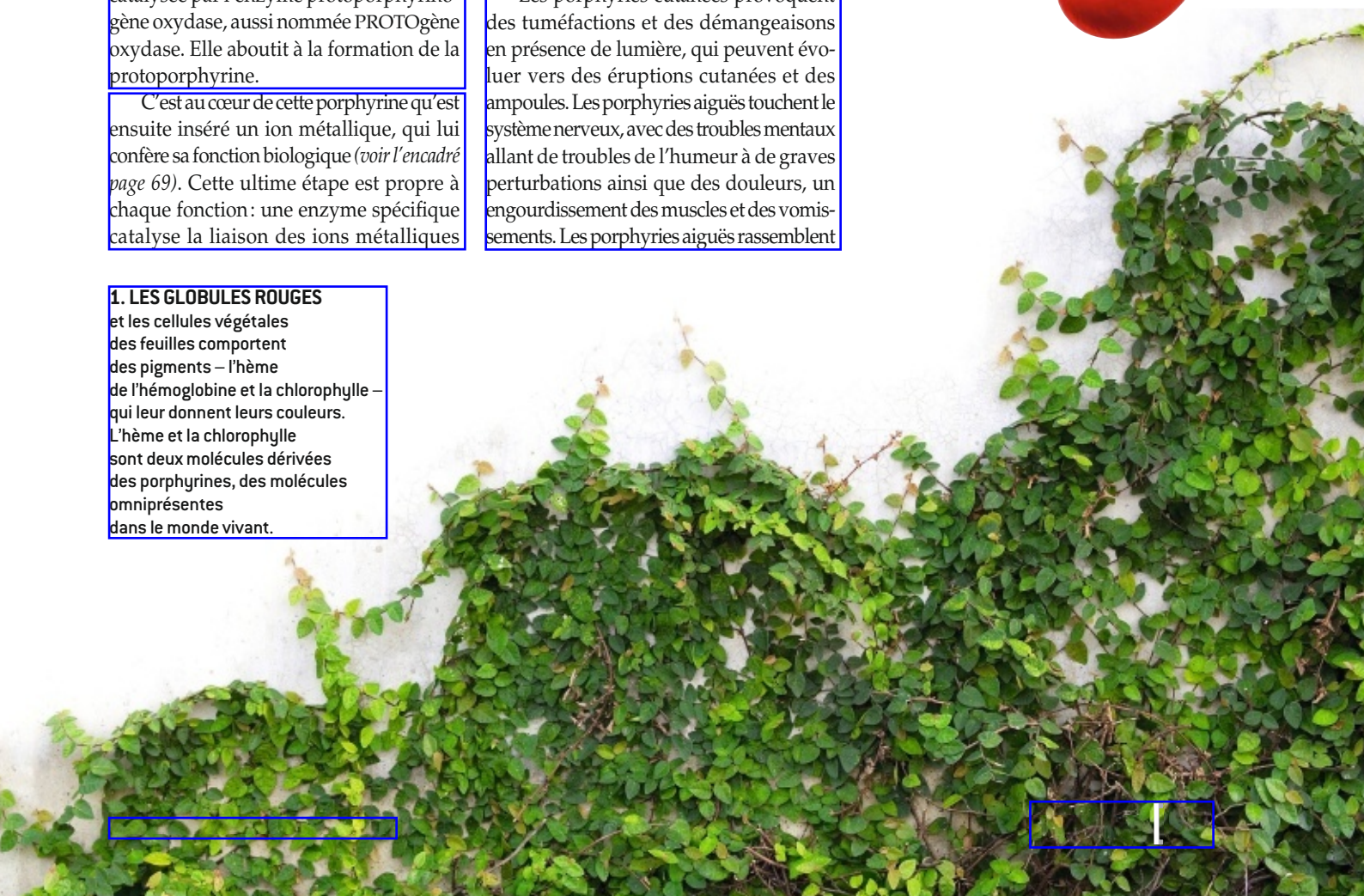
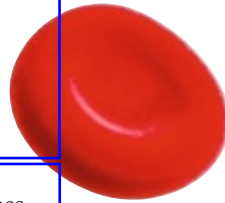
Chez l'homme, ce sont les anomalies de production de l'hème qui conduisent aux porphyries. L'hème est synthétisé dans le foie et la moelle osseuse – au sein des mitochondries, organites des cellules où a lieu la respiration cellulaire. La majeure partie de ces molécules forme l'hémoglobine des globules rouges. Lorsqu'une des enzymes de la voie de biosynthèse n'est pas fonctionnelle, des précurseurs – de couleur rouge-pourpre – des porphyrines s'accumulent dans les cellules, en général en amont de l'étape bloquée. C'est cette accumulation qui entraîne une porphyrie.

On a détecté de tels dysfonctionnements associés à chacune des étapes de la synthèse de l'hème (voir l'encadré page 71). Héréditaires, ils sont dus à la mutation du gène codant l'enzyme correspondante. Huit types de porphyrie ont ainsi été décrits selon l'enzyme mutée. On les classe en deux groupes en fonction de leurs symptômes : les porphyries cutanées et les porphyries aiguës.

Les porphyries cutanées provoquent des tuméfactions et des démangeaisons en présence de lumière, qui peuvent évoluer vers des éruptions cutanées et des ampoules. Les porphyries aiguës touchent le système nerveux, avec des troubles mentaux allant de troubles de l'humeur à de graves perturbations ainsi que des douleurs, un engourdissement des muscles et des vomissements. Les porphyries aiguës rassemblent

1. LES GLOBULES ROUGES

et les cellules végétales des feuilles comportent des pigments – l'hème de l'hémoglobine et la chlorophylle – qui leur donnent leurs couleurs. L'hème et la chlorophylle sont deux molécules dérivées des porphyrines, des molécules omniprésentes dans le monde vivant.



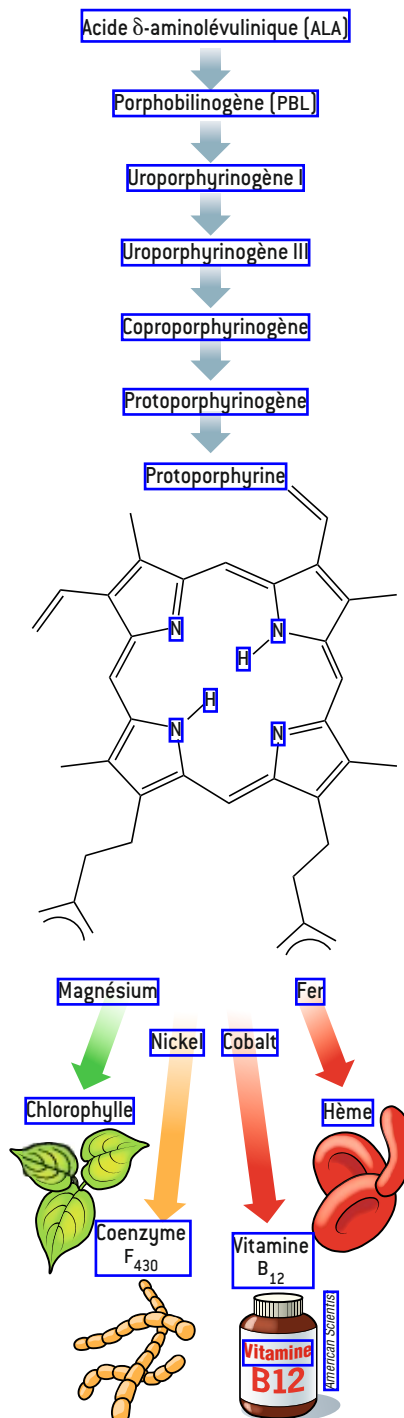
trois maladies génétiques rares assez voisines : la porphyrie aiguë intermittente, la coproporphyrémie héréditaire et la porphyrie variegata (ou porphyrie mixte). Des symptômes aigus chez ces patients porphyriques peuvent apparaître sous l'effet de facteurs déclenchants (médicaments, stress). Une porphyrie aiguë non liée à des facteurs génétiques peut également apparaître à la suite d'une exposition à des métaux lourds (le saturnisme causé par le plomb en est une), à des hydrocarbures aromatiques polyhalogénés (un type de polluant environnemental) et à d'autres composés, qui interfèrent avec la voie de la porphyrine.

La porphyrie variegata est liée à un déficit en PROTOgène oxydase. Les personnes atteintes portent un allèle déficient du gène de cette enzyme, ce qui réduit son activité de moitié par rapport à la normale. Elles présentent à la fois des symptômes neuropsychiatriques et des lésions cutanées, associés à une photodermatite chronique (sensibilité de la peau à la lumière), ainsi qu'une concentration de porphyrines supérieure dans les selles.

Les trois quarts environ des individus porteurs de cet allèle déficient restent asymptomatiques et mènent une vie normale, mais doivent éviter de s'exposer à une lumière intense, à certains médicaments ou à un stress, au risque de déclencher des crises. Les rares personnes chez qui la maladie se manifeste se rétablissent en général complètement et ont moins de crises quand elles avancent en âge. Néanmoins, les crises aiguës sont parfois très graves. Les recherches actuelles visent à les prévenir et à mettre au point des thérapies géniques ciblées.

La plante vampire

Chez les végétaux, la plupart des porphyries passent inaperçues, car les plantes atteintes ne survivent vraisemblablement pas. Cependant, Gongshe Hu et ses collègues de l'Université du Missouri, aux États-Unis, ont récemment caractérisé une lignée de maïs nommée Les22 qui présente des lésions sur son feuillage après exposition à la lumière. Ils ont cloné Les22, puis séquencé son génome et identifié le gène muté. Celui-ci code l'uroporphyrinogène décarboxylase, une enzyme de la voie de synthèse des porphyrines animales et végétales. Chez l'homme, les mutations de l'uroporphyrinogène décarboxylase sont associées à la porphyrie cutanée tardive, qui se manifeste par des lésions dermatolo-



2. LA PARTIE DE LA VOIE DE SYNTHÈSE des porphyrines commune à tous les organismes est une chaîne de réactions enzymatiques dont le premier substrat est l'acide δ -aminolévulinique. Une enzyme différente catalyse chaque étape. Lors de la dernière étape est produite la protoporphyrine. Cette molécule en forme d'anneau est une porphyrine. Selon l'ion métallique qui se fixera en son centre, elle deviendra l'un des pigments essentiels pour le métabolisme des organismes vivants : l'hème chez l'animal, la chlorophylle chez les végétaux, la coenzyme F_{430} et la vitamine B_{12} [vitale pour l'homme] chez certaines bactéries.

giques dues à une accumulation excessive d'uroporphyrinogène. Les feuilles du maïs Les22, dont le gène est muté, sont quant à elles photosensibles – une caractéristique de certaines porphyries humaines. Pour cette raison, certains biologistes ont surnommé ce maïs la plante vampire.

Si de telles anomalies constituent une plaie pour l'homme, elles se sont révélées fort utiles en agronomie, où de nombreuses recherches visent à mettre au point des herbicides efficaces pour tuer les plantes nuisibles aux cultures. Un herbicide est un composé chimique de petite taille qui inhibe la fonction d'une molécule cible. Pour trouver de tels composés, les industriels ont synthétisé des centaines de milliers de molécules candidates, testé leur effet sur des plantes et sélectionné celles qui entraînent la mort des plantes. Parmi elles, ils ont identifié des herbicides actifs à de faibles concentrations qui provoquent une décoloration et un dessèchement rapides du feuillage à la lumière : les feuilles se creusent en coupe, se froissent, prennent une couleur bronze et se nécrosent.

Des herbicides inspirés des porphyrines

Le premier herbicide fondé sur ce principe, le nitrofène, a été mis sur le marché en 1964. Au début, les herbicides de ce type ont été utilisés dans les cultures du soja et de la canne à sucre au Brésil. On avait établi dès 1969 que ces herbicides sont actifs à la lumière. Mais leur mécanisme d'action n'a été compris qu'à la fin des années 1980, lorsque Michel Matringe, de l'Institut national de la recherche agronomique (INRA), à Dijon, et ses collègues ont découvert que les membranes cellulaires perdent leur intégrité à la suite de l'accumulation d'un pigment photodynamique (activé par la lumière), identifié comme étant la protoporphyrine.

Ce résultat indiquait qu'une étape biochimique en aval de la synthèse de la protoporphyrine est inhibée. Pourtant, aucune des enzymes testées ne se révéla être la cible de ces herbicides. Toutefois, avec l'aide de biochimistes spécialistes des porphyrines, M. Matringe et ses collègues ont fait le lien avec l'accumulation de protoporphyrine causée par le déficit de l'activité de la PROTOgène oxydase chez l'homme (dans la porphyrie variegata). Ils ont ainsi prouvé que les herbicides de la classe des diphényléthers, tel le nitrofène, inhibent le fonction-

nement d'une des deux formes de l'enzyme végétale. Les végétaux produisent en effet la PROTOgène oxydase sous deux formes, l'une située dans la membrane externe des chloroplastes (les organites des cellules végétales où s'effectue la photosynthèse), l'autre localisée dans les mitochondries. Les herbicides inhibent la forme chloroplastique de l'enzyme, ce qui entraîne une accumulation de la protoporphyrine dans les cellules.

Il s'agit d'un cas particulier où l'inhibition d'une enzyme conduit à l'accumulation du produit de la réaction qu'elle catalyse, et non de ses précurseurs. Ce paradoxe apparent est lié au fait que la localisation, au sein de la cellule, des précurseurs de la

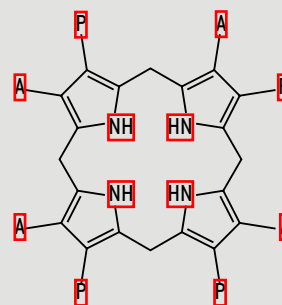
**Les trois quarts
des individus atteints
de la porphyrie variegata
restent asymptomatiques,
mais doivent éviter
de s'exposer à une lumière
intense, à certains
médicaments ou
à un stress.**

prophyrine est altérée. Chez les humains atteints de porphyrie variegata, lorsque la PROTOgène oxydase est inhibée, le protoporphyrinogène, le précurseur de la protoporphyrine, s'accumule. Chez les plantes, le protoporphyrinogène en excès diffuse à travers la membrane externe des chloroplastes vers le cytoplasme, où il s'accumule et se transforme spontanément, sans enzyme, en protoporphyrine sous l'effet de l'oxygène et de la lumière (voir la figure 3).

La protoporphyrine produite est fortement photodynamique: en présence de lumière, elle produit des espèces réactives de l'oxygène (par exemple, l'oxygène singulet, une forme excitée de la molécule d'oxygène) qui réagissent avec les lipides de la membrane

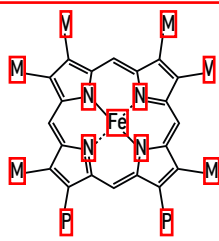
LES METALLOPORPHYRINES : LES MOLÉCULES DE LA VIE

Les quatre principales métalloporphyrines – l'hème, la chlorophylle, la vitamine B₁₂ et le cofacteur F₄₃₀ – sont toutes synthétisées à partir d'une même molécule, l'uroporphyrinogène III (*ci-contre*), formée de quatre noyaux pyrroles (cycles aromatiques de quatre atomes de carbone et un d'azote, N) reliés en anneau par des ponts carbonés. Au centre de l'anneau, ces noyaux fixent un cation métallique par liaisons électrostatiques (on dit qu'ils chélatent des métaux). Les métalloporphyrines diffèrent selon l'ion métallique présent en leur centre. Elles constituent une classe de pigments: en fonction de la nature de l'ion métallique et de son état d'oxydation, chaque molécule absorbe la lumière visible à une longueur d'onde qui lui est propre, ce qui donne leur couleur aux cellules qui en produisent.

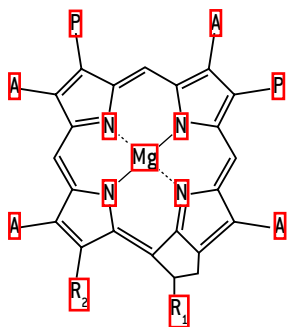


1 Chez l'animal, l'hème, qui porte un ion fer (Fe^{2+}), est associé à des protéines essentielles et participe à leur fonction.

Dans l'hémoglobine, il transporte l'oxygène et donne au sang oxygéné sa couleur rouge (le sang à faible teneur en oxygène est plus sombre). Dans les cytochromes, des coenzymes de la chaîne respiratoire dans les cellules, l'hème assure le transport des électrons. Dans certaines enzymes telles les peroxydases, l'hème participe à la catalyse des réactions associées.

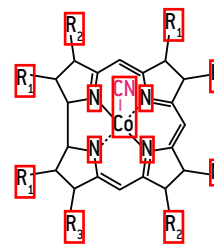


2 Les chlorophylles, qui portent un ion magnésium (Mg^{2+}), assurent la photosynthèse [c'est-à-dire la transformation de la lumière en énergie] des plantes, algues et cyanobactéries, et leur confère leur couleur verte. Le radical R₂ est un groupe-ment alcool à longue chaîne (20 atomes de carbone), le phytol, qui forme une sorte de queue. Les chlorophylles se lient à des protéines de membranes internes des chloroplastes (cellules végétales) ou des cyanobactéries, les tylakoïdes. Elles absorbent la lumière visible à certaines longueurs d'onde, ce qui active la photosynthèse.

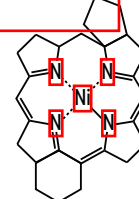


3 La vitamine B₁₂, ou cobalamine porte un ion cobalt (Co^{2+}) qui lui confère une couleur rouge pourpre. Elle est

essentielle au fonctionnement du système nerveux (elle participe à la synthèse de neuromédiateurs et intervient dans le maintien de l'intégrité de la gaine de myéline – qui protège les nerfs et optimise leur fonctionnement) et à l'hématopoïèse (la formation du sang). Elle agit comme cofacteur de plusieurs enzymes, dont celles impliquées dans la synthèse de la thymidine, une des briques de base (nucléotides) de l'ADN. Elle intervient également dans le métabolisme des acides aminés et des acides gras. Elle existe sous plusieurs formes de diverses stabilités, qui constituent la famille des cobalamines. Les animaux et les végétaux ne synthétisent pas la vitamine B₁₂, qui est produite par des micro-organismes (bactéries, champignons, algues). Ils doivent donc l'assimiler par l'alimentation.



4 Produit par les bactéries qui métabolisent le méthane, le cofacteur F₄₃₀, porteur d'un ion nickel (Ni^{2+}), est indispensable à l'étape finale de la méthanogenèse (c'est un cofacteur de l'enzyme qui catalyse cette étape, la méthyl-réductase) et de la réaction inverse. Il absorbe la lumière à une longueur d'onde de 430 nanomètres (d'où son nom) et renvoie une lumière de couleur jaune.



LES AUTEURS



Franck E. DAYAN est physiologiste des plantes au Département d'agriculture des États-Unis et professeur adjoint au Département de chimie médicale à l'Université de Mississippi-Oxford.

Emilie A. DAYAN est diplômée de la même université en économie, études internationales et français.

des cellules (ils sont peroxydés). Ses lipides dégradés, la membrane perd son intégrité et des composés (éthane, éthylène et malondialdéhyde) sont libérés. Cette dégradation de la membrane des cellules est responsable des lésions sur le feuillage. Par ailleurs, la synthèse de chlorophylle étant bloquée, on observe une décoloration des chloroplastes et une inhibition de la photosynthèse.

Les herbicides de type diphényléther provoquent aussi des lésions sur le feuillage des cultures traitées qu'ils sont censés protéger, mais ces plantes se remettent vite, car soit elles dégradent rapidement l'herbicide ou la protoporphyrine libérée, soit, comme le riz, elles produisent des molécules anti-oxydantes en quantité.

Des résistances à ces herbicides commencent à apparaître. Des biotypes de chanvre

d'eau (*Amaranthus tuberculatus*) résistants ont été identifiés récemment. Ces biotypes résistent à plusieurs classes d'inhibiteurs de la PROTOgène oxydase. La protoporphyrine s'accumule moins dans la cellule, ce qui diminue les dommages causés à la membrane. Cette résistance est liée à une spécificité du gène *PPX2L*, qui code, chez ces biotypes de chanvre, la forme mitochondriale de la PROTOgène oxydase. Cette forme n'est pas la cible principale des herbicides. Toutefois, le gène porte une extension qui adresse l'enzyme à la fois vers les mitochondries et vers les chloroplastes.

Patrick Tranel, de l'Université de l'Illinois, aux États-Unis, et ses collègues ont découvert qu'il manque au gène *PPX2L* une séquence qui code un acide aminé essentiel pour l'activité de la PROTOgène oxydase,

La folie du roi George III et la phobie de Dracula : des porphyries ?

George III, roi d'Angleterre de 1760 jusqu'à sa mort en 1820, et Dracula étaient-ils atteints de porphyrie ? C'est en tout cas ce que l'on a longtemps cru pour le premier. Sous son règne, l'Empire britannique était bien parti pour exercer une domination économique sur le commerce international et une suprématie militaire sur tous les océans. Mais cette montée en puissance fut ternie par une étrange maladie du roi, dont les décisions parfois irrationnelles auraient conduit à la guerre d'Indépendance américaine et à la perte des colonies d'Amérique du Nord.

Les comptes rendus médicaux royaux indiquent que le roi George a traversé des épisodes d'une maladie invalidante. En particulier, cinq épisodes graves combinaient des troubles physiques – de fortes douleurs abdominales, des urines « couleur vin de Porto », une paralysie des bras et des jambes – et une profonde dégradation de ses facultés mentales. Le comportement du roi fut si irrationnel au cours d'un épisode qui a duré d'octobre 1788 à février 1789, qu'il fut à l'origine d'une révision constitutionnelle, la *Regency Crisis*. De 1811 jusqu'à sa mort en 1820, la santé du roi continua à décliner. La maladie détériora ses facultés à un point tel qu'à la fin de sa vie, il nécessitait des soins constants.

On a d'abord pensé que ces périodes d'incapacité mentale résultaient d'une maladie psychiatrique. Mais dans les années 1960, des historiens ont émis l'idée que le roi souffrait de porphyrie – plus précisément de porphyrie varie-



gata. Les crises de cette maladie pouvant être déclenchées par une exposition à des métaux toxiques et autres contaminants environnementaux, répandus en Angleterre à cette époque, on a recherché de telles traces dans les cheveux du roi : ceux-ci présentaient une concentration normale de mercure et de plomb, mais des concentrations toxiques d'arsenic. Un empoisonnement à l'arsenic pouvait donc avoir été le déclencheur des crises de porphyrie du roi George III.

En 1968, en étudiant les dossiers médicaux de 13 générations de membres de la famille du roi, le médecin britan-

nique Ida MacAlpine et ses collègues ont découvert que le roi et d'autres membres de la lignée royale présentaient des signes cliniques de porphyrie. Quant aux autres membres de la famille, peut-être étaient-ils des malades asymptomatiques, comme 75 pour cent des personnes atteintes de porphyrie ?

Certains historiens ont postulé que la porphyrie a paralysé l'énergie du roi George III, obscurcissant son jugement et le rendant « fantasque ». Des sautes d'humeur et une raison sérieusement détériorée l'ont conduit à prendre nombre de décisions imprudentes et irréfléchies, qui rompirent les liens avec les sujets britanniques vivant dans les colonies américaines, au détriment à la fois de la Grande-Bretagne et des loyalistes (les colons américains demeurés fidèles aux Britanniques durant la guerre de l'Indépendance). Selon ces historiens, si le roi n'avait pas été frappé d'incapacité par la maladie, il aurait pu éviter la guerre d'Indépendance américaine.

Aujourd'hui, ce diagnostic rétrospectif de porphyrie est controversé. Deux études, publiées en 2010 par Timothy Peters, de l'Université de Birmingham, et ses collègues, ont réexaminé les comptes rendus médicaux du roi d'un point de vue clinique et psychiatrique, et ont conclu qu'il aurait plutôt souffert de psychose maniaco-dépressive.

Quant à Dracula, rien ne prouve que l'écrivain irlandais Bram Stoker connaissait les porphyries lorsqu'il a créé ce personnage, dont certains traits ressemblent aux symptômes associés à ces maladies. Stoker s'est inspiré de Vlad III, un prince de Valachie (une province de Roumanie) du XV^e siècle réputé pour sa cruauté envers ses ennemis. Surnommé Tepes – qui signifie l'empaleur –, il aurait tué 20 000 à 40 000 civils européens (la plupart par empalement) et jusqu'à 100 000 musulmans turcs ! Fasciné, Stoker construisit son personnage de vampire à partir des récits historiques faisant état de la cruauté de Vlad et publia son roman *Dracula* en 1897 (du roumain *dracul*, qui signifie diable).

Toutefois, David Dolphin, chimiste canadien spécialiste des porphyries, a relevé une similitude entre le personnage imaginaire de Dracula et certains symptômes de patients atteints de porphyrie. Par exemple, l'accumulation de pigments photodynamiques dans l'épiderme et la rétine rend ces personnes sensibles à la lumière. De tels effets conduisent aussi parfois à un dessèchement des doigts et des lèvres, et les gencives peuvent se resserrer pour faire apparaître des dents semblables à des crocs (les fameuses canines des vampires ?) avec des teintes rougeâtres dues à des concentrations élevées de porphyrines.

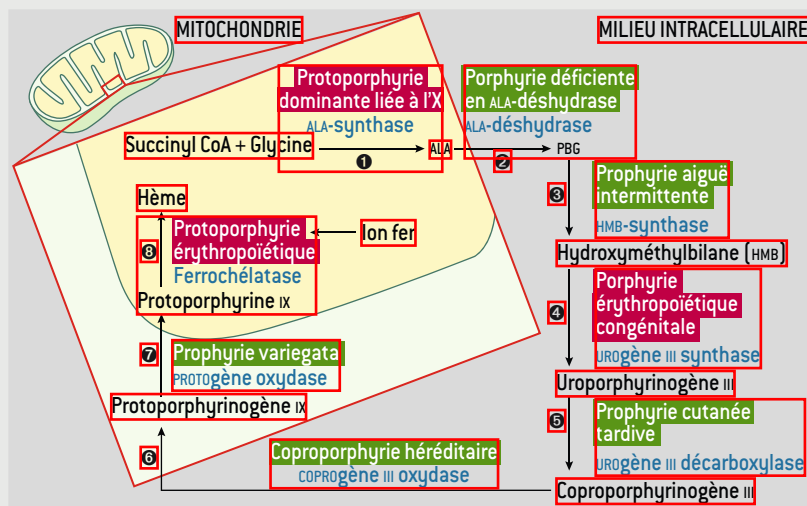
nommé GLY-210. Chez les plantes, la forme mitochondriale fonctionnelle de l'enzyme est constituée de deux sous-unités liées de façon assez lâche. Chaque sous-unité comporte trois domaines (voir la figure 4) : l'un se lie au substrat, le deuxième à la membrane mitochondriale et le troisième à un facteur d'oxydoréduction nommé flavine adénine dinucléotide (FAD). C'est ce troisième domaine de la PROTOgène oxydase qui contient le site actif de l'enzyme. Et c'est au cœur de ce site actif que l'acide aminé GLY-210 a disparu. Or cet acide aminé joue un double rôle : d'une part, il participe au positionnement, sur l'enzyme, du substrat de la réaction qu'elle catalyse, le protoporphyrinogène ; d'autre part, il contrôle l'efficacité de la catalyse en imposant la distance entre le substrat et le facteur FAD – lequel copilote la réaction enzymatique.

Une résistance due à un acide aminé

Avec mes collègues, nous avons montré que cette lacune ne diminue pas l'affinité pour le protoporphyrinogène ou le FAD, mais réduit l'efficacité catalytique de l'enzyme. Cependant, elle diminue aussi l'affinité des herbicides pour la PROTOgène oxydase, ce qui compense la baisse de l'efficacité catalytique. Ainsi, l'absence d'un seul acide aminé a suffi à modifier en profondeur la conformation de la PROTOgène oxydase, car cet acide aminé stabilise l'hélice de la sous-unité catalytique de l'enzyme. L'absence de l'acide aminé réduisant la taille de la poche où se lie le substrat et le facteur FAD, il devrait être possible de contrer cette résistance en produisant des herbicides plus larges qui occuperaient une plus grande partie de la poche. De telles molécules ont été développées par ailleurs, mais n'ont pas encore été testées sur le biotype résistant de chanvre d'eau.

Depuis les années 1980, l'utilisation du nitrofène est interdite dans nombre de pays, dont l'Europe, car chez l'animal (souris et rats), plusieurs études ont montré que son ingestion augmente le risque de développer un cancer, et que l'exposition *in utero* risque d'entraîner des malformations du cœur et des poumons, ainsi qu'une détresse respiratoire. En revanche, les études de l'impact sur l'environnement et la santé des autres herbicides inhibant la PROTOgène oxydase suggèrent un faible risque de toxicité. Chez l'animal, seule une ingestion à haute dose a conduit à des symptômes de type porphyrie.

Huit enzymes, huit porphyries chez l'homme



Les porphyries constituent un groupe de huit maladies métaboliques héréditaires rares (moins d'un cas sur 100 000 en Europe). Elles sont caractérisées par des crises neuro-viscérales aiguës (douleurs abdominales, nausées et vomissements, constipation, auxquels peuvent s'ajouter confusion, faiblesse musculaire, voire paralysies, troubles psychiatriques et coloration anormale des urines), des lésions cutanées ou la combinaison des deux. Ces symptômes apparaissent surtout à l'âge adulte, mais certaines porphyries se manifestent dès la naissance.

Chaque porphyrie est la conséquence d'une anomalie fonctionnelle d'une des huit enzymes intervenant dans la biosynthèse de l'hème (en bleu sur la figure ci-dessus). Ces anomalies entraînent, dans le foie ou la moelle osseuse, une accumulation de porphyrines ou de leurs précurseurs (acide δ -aminolévulinique ou ALA et porphobilinogène ou PBG). L'accumulation de PBG et surtout de ALA est à l'origine des manifestations neurologiques.

Les anomalies enzymatiques résultent de mutations des gènes qui codent les huit enzymes. Sept de ces huit gènes sont situés sur des autosomes (paires de chromosomes non sexuels). Dans le cas des porphyries, la mutation d'une seule des deux copies d'un gène entraîne la maladie. Le huitième

gène impliqué est situé sur le chromosome X (étape 1 sur la figure).

Les porphyries sont classées en deux groupes, hépatique (en vert ci-dessus) et érythropoïétique (en rouge), selon que l'anomalie métabolique prédomine dans le foie ou la moelle. La porphyrie cutanée tardive et les porphyries érythropoïétiques se manifestent par des lésions cutanées. Les porphyries hépatiques aiguës se caractérisent surtout par des crises neuro-viscérales.

Le diagnostic repose sur les dosages des porphyrines et de leurs précurseurs ALA et PBG dans les milieux biologiques (urines, selles, sang). Il est complété par un dosage de l'activité de l'enzyme en cause et par le séquençage du gène correspondant. Lorsqu'une mutation est identifiée chez un individu, une enquête familiale peut être déclenchée dans le cadre du conseil génétique.

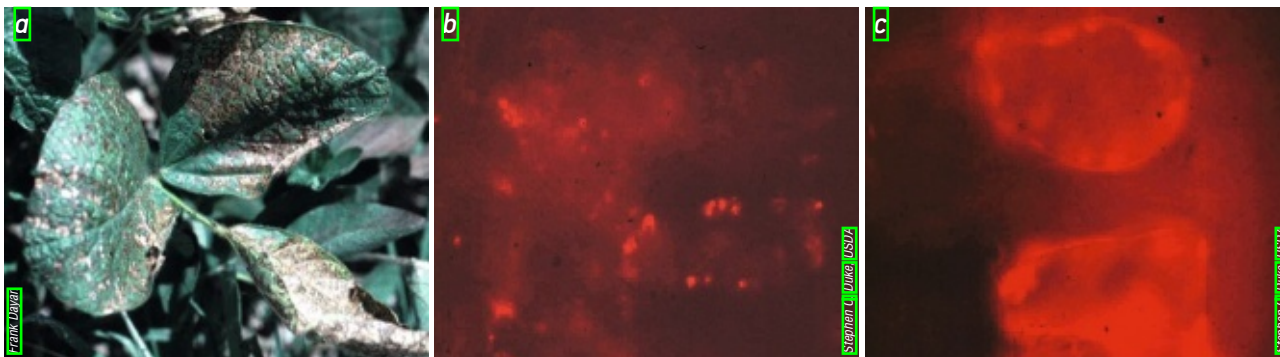
En France, le diagnostic, le traitement, le conseil génétique et la recherche sur les porphyries et l'animation du réseau européen EPNET sont assurés par notre centre. Le traitement des crises aiguës des porphyries hépatiques est d'abord symptomatique : administration de morphine contre la douleur, éviction des facteurs déclenchants (stress, alcool, jeûne, médicaments nocifs en cas de porphyrie...), etc.

Puis un traitement plus spécifique est appliqué : une perfusion d'hème humaine (Normosang®, Orphan Europe), un dérivé de l'hème inhibant l'activité de l'enzyme qui catalyse la production d'ALA (ALA-synthase), ralentit la production excessive des précurseurs toxiques ALA et PBG. Cette action est aussi renforcée par un apport important de glucose.

Les signes cutanés de la porphyrie cutanée se traitent par des saignées associées au traitement des causes déclenchantes (hépatite C, alcool). La maladie de Günther, grave porphyrie érythropoïétique de l'enfant, bénéficie maintenant d'un traitement spectaculaire avec la greffe de moelle. Par ailleurs, les porphyries hépatiques ou érythropoïétiques font l'objet de recherches en vue d'une thérapie génique ciblée, déjà efficace sur plusieurs modèles de souris.

Quant au Roi George III (voir l'encadré page ci-contre), il est maintenant bien établi qu'il ne souffrait pas de porphyrie, pas plus que ses descendants. De même, le lien entre vampires et porphyries ne résulte que d'une compilation abusive de tous les symptômes des porphyries réunis.

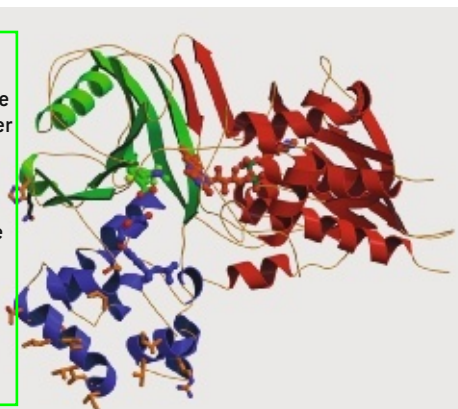
Jean-Charles Deybach
Centre français
des porphyries
Hôpital Louis Mourier APHP
Professeur à l'Université
Paris-Diderot, INSERM U773



3. LES HERBICIDES qui inhibent l'enzyme PROTOgène oxydase provoquent une photodécoloration des plantes nuisibles (a). Cette décoloration est due à la perturbation de la production de protoporphyrine, le produit de la réaction catalysée par l'enzyme. Normalement, la protoporphyrine s'accumule dans les chloroplastes, des organites des cellules végétales (b, ici dans des cellules de feuilles embryon-

naires – cotylédons – de concombres). Mais trois heures après un traitement avec un tel herbicide, la protoporphyrine s'accumule dans tout le cytoplasme des cellules (c). Habituellement produite dans les chloroplastes à partir de la protoporphyrine, la chlorophylle n'est plus synthétisée, ce qui entraîne la décoloration des chloroplastes et, par conséquent, de la plante.

4. L'ENZYME PROTOgène oxydase est constituée de deux sous-unités (une seule est représentée ici), chacune composée de trois domaines. Un premier domaine (en vert) se lie au substrat de la réaction catalysée par l'enzyme, le protoporphyrinogène ; un deuxième (en bleu) ancre l'enzyme à la membrane de l'organite où a lieu la réaction et un troisième accueille le facteur d'oxydoréduction FAD. Le couple enzyme-FAD produit une protoporphyrine en ôtant des atomes d'hydrogène au protoporphyrinogène.



pyrène des entités chimiques (groupement chimique, nanoparticule) qui cibleraient les cellules tumorales, faciliteraient l'élimination du composé par l'organisme après la thérapie, voire absorberaient mieux la lumière.

Des cellules photovoltaïques flexibles

Les propriétés photoniques des porphyrines sont aussi utilisées dans le développement de cellules photovoltaïques flexibles à base de colorant fonctionnant selon un principe proche de celui de la photosynthèse. Conçues il y a 20 ans par Michel Graetzel, de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, les premières cellules à colorant avaient un rendement trop faible pour être commercialisées. Mais récemment, M. Graetzel a remplacé le colorant utilisé (du ruthénium) par un colorant à base de métalloporphyrine au zinc, et a ainsi augmenté considérablement le rendement de ses cellules. Leur commercialisation a déjà commencé : semi-transparentes, elles sont notamment utilisées dans la fabrication de façades vitrées.

Chez tous les organismes vivants, des molécules (acides aminés, acides nucléiques, acides gras, glucides) servent d'unités de construction de structures plus importantes. L'anneau de porphyrine peut jouer un rôle similaire, par sa capacité à s'assembler en de multiples molécules. Il est probable que nous ne soyons qu'aux balbutiements de l'exploitation de leurs propriétés physiques. On envisage même de les utiliser comme transporteurs d'électrons dans la fabrication de puces électroniques pour les ordinateurs.

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

BIBLIOGRAPHIE

H. Puy et al., *Porphyrins*, *Lancet*, vol. 375, pp. 924-937, 2010.

F. E. Dayan et al., *Biochemical and structural consequences of a glycine deletion in the α -8 helix of protoporphyrinogen oxidase*, *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 1804, pp. 1548-1556, 2010.

M. Koch et al., *Crystal structure of protoporphyrinogen IX oxidase : a key enzyme in haem and chlorophyll biosynthesis*, *EMBO Journal*, vol. 23, pp. 1720-1728, 2004.

M. Matringe et al., *Protoporphyrinogen oxidase as a molecular target for diphenyl ether herbicides*, *Biochemical Journal*, vol. 260, pp. 231-235, 1989.

Il a même été proposé d'utiliser ces molécules dans le traitement de tumeurs par photothérapie. En pratique, les biochimistes privilégient plutôt l'utilisation des porphyrines elles-mêmes. La photothérapie dynamique, qui tue les cellules cibles en activant, par illumination, un agent chimique photosensible, est une stratégie alternative émergente dans le traitement de certains cancers (œsophage, poumon, peau, vessie, prostate...) ou de pathologies non malignes accessibles à la lumière.

De par leurs propriétés photosensibles et leur production naturelle chez l'homme, les porphyrines sont des candidats séduisants. À l'Institut Curie (Paris), notamment, Philippe Maillard et ses collègues du groupe Chimie des porphyrines et photothérapie (UMR 176 CNRS) conçoivent et synthétisent de nouveaux dérivés de porphyrines en vue d'une utilisation en photothérapie. Les dérivés connus présentent en effet plusieurs inconvénients : faible sélectivité tumorale, absorption limitée de la lumière, effets secondaires. L'idée est de fixer à l'anneau de por-

Rendez-vous sur

■ POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

■ Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.

■ Nouveau ! Écoutez nos entretiens audio ou téléchargez-les.

■ Recevez nos lettres d'information et réagissez aux articles en vous inscrivant sur www.pourlascience.fr/newsletters

■ Consultez les archives de tous nos magazines depuis 2004.

■ Accédez aux numéros numériques compris dans votre abonnement en créant votre compte.

■ Suivez notre actualité en direct :



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



<http://twitter.com/pourlascience>



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

+ de 9000 fans



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

HISTOIRE DES SCIENCES

Herschel et l'énigme de l'infrarouge

L'astronome William Herschel a découvert et étudié le rayonnement infrarouge. Il eut l'intuition qu'il était de même nature que la lumière visible. L'ensemble sera désigné plus tard par le terme d'ondes électromagnétiques.

Jack White

La plupart des encyclopédies et livres de physique attribuent à l'astronome britannique sir William Herschel la découverte du rayonnement infrarouge en 1800. Toutefois, cela n'est pas strictement exact et ne rend pas tout à fait justice aux travaux de Herschel.

Nous découvrons tous très jeunes l'infrarouge, quand nous sentons la chaleur à distance d'un objet chaud ; et nous savons que ce rayonnement est invisible, car la chaleur se ressent aussi dans l'obscurité la plus totale. Herschel a mis en évidence l'existence de ce rayonnement et a aussi trouvé les premières preuves que la lumière et l'infrarouge sont deux aspects d'un même phénomène, nommé aujourd'hui rayonnement électromagnétique. Lors d'une série d'expériences simples, Herschel a trouvé la première pièce d'une des grandes énigmes de la physique, dont la résolution a nécessité encore un siècle.

Pour comprendre la démarche de Herschel, ses articles originaux sont une source riche d'informations. Ils semblent directement restituer les réflexions et les expériences de leur auteur. La plus grande difficulté en lisant ces écrits est de suivre le fil du raisonnement de Herschel, entrecoupé de nombreuses digressions et de pages de relevés de température.

Dans un article lu à la *Royal Society* de Londres le 27 mars 1800, Herschel utilisa le terme de « chaleur radiante » pour désigner cette chaleur ressentie à distance. Le terme « infrarouge » [infra signifie « en dessous » en latin] n'est apparu que dans les années 1880, d'un auteur inconnu.

Herschel n'était pas initialement un scientifique. D'origine allemande, il a commencé sa carrière comme musicien dans une formation militaire. En 1773, à l'âge de 34 ans, six ans après son arrivée à Bath, au Royaume-Uni, où il occupait un poste de professeur de musique, il acheta un petit télescope et un livre d'astronomie. C'était le début d'une nouvelle carrière.

Célébrité d'astronome

Dès l'année suivante, il polissait ses propres miroirs pour construire des télescopes plus grands et de meilleure qualité, et il passait ses nuits à étudier le ciel étoilé. La dextérité de Herschel lui valut rapidement la réputation de meilleur fabricant de télescopes de son époque. Sa célébrité atteignit son point culminant en 1781, quand il découvrit la planète Uranus. Il fut alors nommé astronome royal, fonction dotée d'un modeste salaire annuel de 200 livres.

Dès lors, Herschel put consacrer tout son temps à l'astronomie. Avec sa sœur Caroline — également une astronome reconnue —, il s'installa à Slough, près du château de Windsor, car l'une des conditions posées à sa nomination était qu'il devait être à la disposition du roi George III et de sa famille à tout moment où il leur aurait pris l'envie d'observer les étoiles.

C'est parce qu'il cherchait à mettre au point le meilleur filtre possible pour observer le Soleil en toute sécurité que Herschel a commencé à explorer le domaine des infrarouges. Ses spéculations et conclusions ont été souvent contradictoires, certaines

fausses, mais d'autres très pertinentes. L'histoire des expériences de Herschel est celle du rôle de l'intuition dans la découverte scientifique, et du conflit entre les convictions classiques et les concepts nouveaux.

Le spectre électromagnétique s'étend des rayons gamma (dont les longueurs d'onde peuvent être plus courtes que le diamètre d'un atome) aux ondes radio (avec des longueurs d'onde allant jusqu'à des milliers de kilomètres). Dans l'ensemble du spectre électromagnétique, l'homme ne détecte que deux plages étroites de longueurs d'onde. Nos yeux voient la lumière, qui occupe l'étroite bande de longueurs d'onde comprise entre 0,4 et 0,7 micromètre (du violet jusqu'au rouge), bande centrée approximativement sur la longueur d'onde du rayonnement le plus puissant émis par le Soleil. L'autre partie du spectre que nous percevons est le rayonnement infrarouge, de longueur d'onde comprise entre celles de la lumière visible et celles des micro-ondes, jusqu'à environ 1 000 micromètres, et qui se manifeste par la chaleur que nous ressentons sur la peau.

Dès le XVIII^e siècle, certains savants, tels le Hollandais Herman Boerhaave ou le Suisse Jean-Henri Lambert, discutent du lien entre lumière et chaleur. Il faut attendre le développement de la thermodynamique statistique, au XIX^e siècle, pour décrire la chaleur comme une agitation désordonnée des molécules. Cette agitation, dont la température est une mesure, est responsable de l'émission d'un rayonnement par la matière, qui est majoritairement infrarouge aux températures habituelles (voir la figure 1). Inversement,

le rayonnement infrarouge peut créer une agitation moléculaire et ainsi donner la sensation de chaleur sur la peau.

Bien que la lumière visible et le rayonnement infrarouge correspondent à des gammes voisines de longueurs d'onde (voir la figure 3), ces deux phénomènes sont perçus de façons si différentes qu'il est difficile d'imaginer qu'ils sont de la même nature.

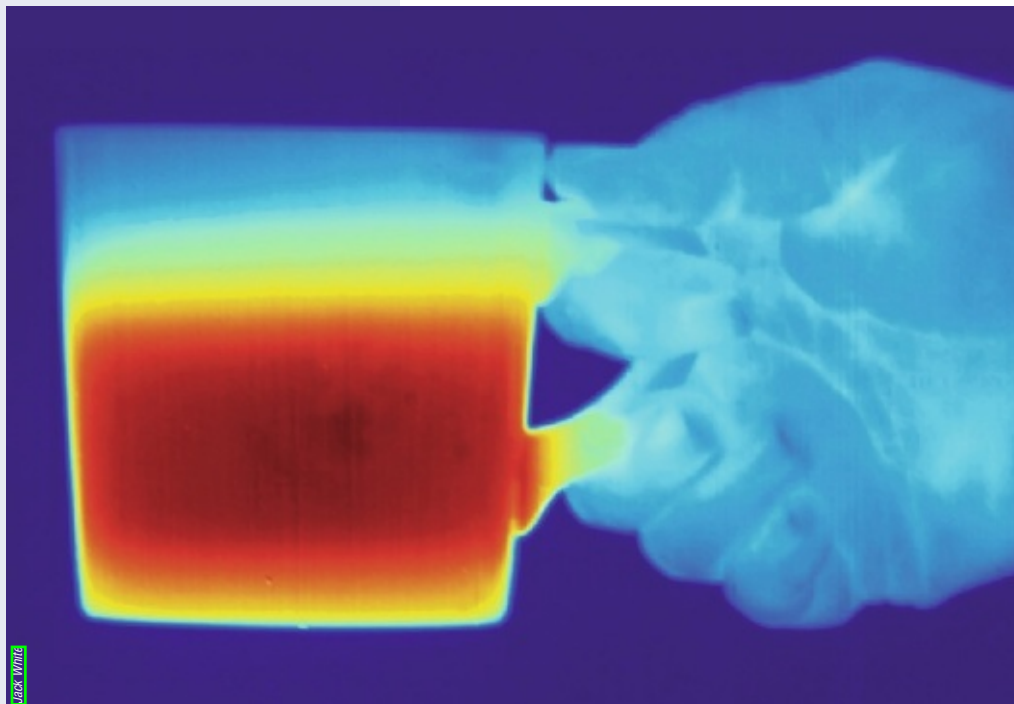
Par ailleurs, la lumière et l'infrarouge ne s'observent pas toujours ensemble. La plupart des sources lumineuses émettent également de l'infrarouge – c'est le cas d'une ampoule à incandescence –, mais on trouve souvent l'infrarouge seul. Un exemple familier est celui du grille-pain électrique qui, après avoir servi, ne rougeoie plus, mais dont la chaleur rayonnée est encore perceptible. Ainsi, lumière et chaleur semblent être deux phénomènes indépendants.

Ces différences pourraient expliquer pourquoi le rapprochement n'a pas été fait pendant de nombreux siècles, en dépit des diverses expériences. Peut-être cette association contraire à l'intuition explique-t-elle pourquoi le lien a été établi presque par accident, par une personne sans véritable formation scientifique.

Herschel observait les caractéristiques de la surface du Soleil depuis un certain nombre d'années, et il soumit un article sur le Soleil et les étoiles fixes à la *Royal Society* en 1794. Parvenir à observer les taches solaires à travers un grand télescope sans s'abîmer les yeux était depuis longtemps un défi. En expérimentant diverses combinaisons de verres colorés et fumés qui servaient de filtres, Herschel nota dans cet article :

« Ce qui semblait remarquable était que, lorsque j'utilisais certains d'entre eux, je ressentais de la chaleur, bien que j'eusse très peu de lumière ; tandis que d'autres me donnaient beaucoup de lumière, mais très peu de sensation de chaleur. »

Cette observation le conduisit à l'idée que les différentes couleurs ont une capacité plus ou moins grande de « chauffer des corps ». Poussant le raisonnement plus loin, Herschel se rendit compte que si la puissance thermique est inégalement distribuée, cela pourrait également être le cas pour la puissance d'éclairement. Il y aurait alors



1. CETTE TASSE contient un liquide chaud (en rouge) qui émet un rayonnement infrarouge. Il est possible de détecter ce dernier avec un appareil spécialisé. Mais la tasse n'émet pas, ou presque pas, de lumière visible. Malgré des aspects différents, la lumière visible et l'infrarouge sont tous deux des ondes électromagnétiques.



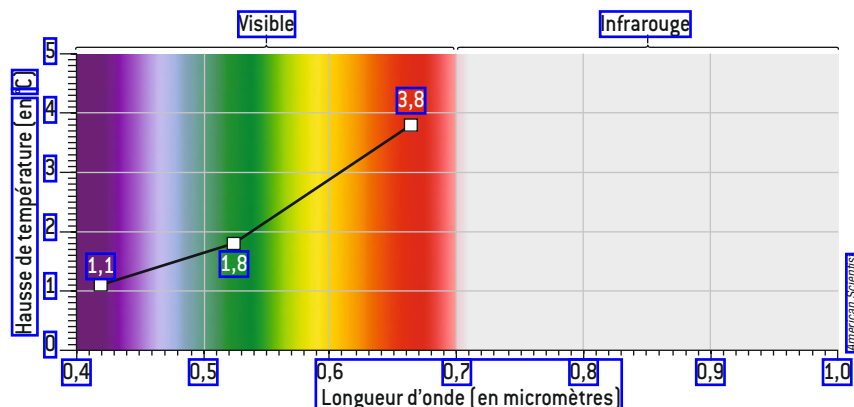
2. SIR WILLIAM HERSCHEL (1738-1822) a découvert le rayonnement infrarouge et a étudié ses propriétés, qui suggéraient une nature semblable à la lumière visible.

une plage optimale de couleur, mais elle serait différente de celle qui correspond au chauffage maximal. La connaissance de ces propriétés devait l'aider à concevoir le meilleur filtre pour observer le Soleil.

S'appuyant sur son expérience de fabrication de télescopes et en optique, Herschel construisit un instrument pour tester cette hypothèse. Il fabriqua ce que l'on nommerait un spectromètre, ou plus précisément un spectroradiomètre : un instrument conçu pour mesurer la puissance du flux lumineux à différentes longueurs d'onde.

Son premier instrument (voir la figure 4) réunit trois composants : un prisme, placé dans une fenêtre exposée au Sud afin de capter la lumière solaire, décomposer les couleurs et les diriger sur une table ; un petit panneau de carton percé d'une fente étroite ne laissant passer qu'une seule couleur ; et des thermomètres au mercure en verre avec leur bulbe noirci pour mieux absorber la lumière. Il plaça un thermomètre à la lumière et les autres dans l'obscurité pour mesurer la température ambiante de la pièce – la température de référence.

Les spectromètres actuels sont bien plus performants en termes de résolution,



3. LES MESURES DE TEMPÉRATURE DE WILLIAM HERSCHEL dans le spectre visible, comparées à la température ambiante, présentent une tendance à l'augmentation. En voulant savoir si cette hausse se poursuivait au-delà de la lumière rouge, Herschel a mis en évidence le rayonnement infrarouge, qu'il nomma « chaleur radiante ».

de sensibilité et de rapidité, mais les éléments de base sont restés les mêmes. On utilise toujours des prismes, mais une meilleure résolution est obtenue par interférence des ondes : les longueurs d'onde sont séparées par interférence constructive et destructive – les amplitudes des ondes s'ajoutant ou s'annulant. Les détecteurs actuels sont des semi-conducteurs refroidis par cryogénie, beaucoup plus petits, rapides et sensibles qu'un thermomètre au mercure. Cependant l'instrument de Herschel, aux mains du soigneux expérimentateur qu'il était, donnait des mesures d'une étonnante précision.

Avec ce dispositif, Herschel releva des températures, comparant tout d'abord les indications des thermomètres dans les conditions ambiantes pour vérifier la cohérence entre les instruments. Il plaça le thermomètre de mesure dans chaque bande de couleur, en l'y laissant dix minutes pour stabiliser la température. En commençant par le rouge, il obtint une mesure moyenne de 3,8 °C au-dessus de la température ambiante. Le vert et le violet donnaient respectivement 1,8 °C et 1,1 °C [voir la figure 3].

Grâce à cette expérience, Herschel confirma que la capacité de chauffage n'était pas la même d'une couleur à l'autre de la lumière incidente. Il entreprit alors de mesurer l'éclairement aux différentes longueurs d'onde.

Pour trouver le maximum d'éclairement, il dirigea les composantes colorées de la lumière sur divers petits objets observés à travers un microscope grossissant 27 fois. À partir de la brillance et de la clarté de ce qu'il vit, il évalua l'éclairement relatif.

Mesurer l'éclairement

Herschel réalisa dix expériences distinctes avec des objets vus en différentes couleurs. Il tenta de distinguer entre la couleur donnant le maximum d'éclairement et celle qui a la meilleure résolution ou « netteté ». Il ne parvint pas à tirer de conclusion concernant la résolution, mais pour l'éclairement, il fut en mesure d'affirmer :

« Le maximum d'éclairement se trouve dans le jaune le plus vif, ou le vert le plus pâle. Le vert lui-même est presque aussi brillant que le jaune ; mais à partir du vert foncé, la puissance d'éclairement diminue très sensiblement. »

Cette observation est remarquable : le jaune-vert est proche de la longueur d'onde où le Soleil émet le plus d'énergie, et exactement là où la sensibilité de l'œil humain est maximale. Estimant qu'il avait prouvé que la chaleur radiante comme la lumière ne sont pas également distribuées entre les couleurs, et muni de résultats de mesure montrant leurs différences, Herschel était prêt à utiliser ces découvertes pour

son problème d'observation du Soleil et la conception de filtres. Mais il ne le fit pas immédiatement. Au lieu de cela, il retourna aux données de température.

En effet, Herschel était surpris par ses résultats sur la température. Celle-ci augmentait progressivement du violet vers le rouge, sans présenter de maximum sous la forme d'un pic. Les mesures semblaient plutôt suggérer que le chauffage se poursuit dans la région sombre au-delà du rouge. Herschel voulut savoir ce qu'il en était.

Si le maximum se trouve en dehors du spectre visible, alors le chauffage ne provient pas de la lumière, mais d'autre chose. Herschel utilisa l'expression « lumière invisible », avec des termes choisis pour indiquer qu'il savait bien que c'était un oxymore :

« Je conclus de la même façon que le rouge pur est un peu en deçà du maximum de chaleur ; lequel se trouve peut-être un peu plus loin que la réfraction visible. Dans ce cas, la chaleur radiante sera au moins partiellement, voire principalement, constituée, si je peux me permettre l'expression, de lumière invisible ; c'est-à-dire de rayons venant du Soleil, qui ont une quantité de mouvement telle qu'ils ne sont pas adaptés à la vision. »

On note dans cet extrait de l'article qu'en décrivant les rayons en termes de quantité de mouvement, Herschel se référait aux expériences d'Isaac Newton de la fin du XVII^e siècle qui concluaient à la nature corpusculaire de la lumière.

La possibilité que la lumière soit de nature ondulatoire avait pourtant été fort bien argumentée par Christiaan Huygens, contemporain de Newton, mais la conception selon laquelle la lumière était un flux de minuscules particules était dominante à l'époque, en particulier en Grande-Bretagne. Ce point de vue changea dans les 15 années suivantes, mais, à ce moment-là, Herschel se représentait la lumière comme des particules ayant plus ou moins d'« efficacité » dans leur effet sur la matière.

Ce n'est pas la notion de rayons invisibles qui intéressait tant Herschel. C'étaient leurs propriétés qui le captivaient. Il était clair pour lui que la chaleur radiante avait les mêmes propriétés optiques de « réfrangi-

bilité » (nommée aujourd'hui réfraction) et de dispersion que la lumière.

La réfraction est le changement de direction d'un rayon lumineux lorsqu'il passe d'un milieu transparent à un autre (conséquence d'un changement de sa vitesse de propagation), comme le passage de l'air au verre. La dispersion (ou décomposition) de la lumière en plusieurs composantes de couleurs différentes est due à la réfraction : comme cette dernière dépend de la longueur d'onde, les différentes couleurs sont réfractées selon des angles différents. Les arcs-en-ciel et les prismes en sont des exemples.

Herschel ne se représentait pas le rayonnement en termes de longueurs d'onde, mais, en tant que fabricant de lentilles, les effets de la décomposition lui étaient familiers et il savait comment les corriger pour produire des lentilles minimisant ce qu'on nomme aujourd'hui l'aberration chromatique, c'est-à-dire le fait que les différentes couleurs traversant une lentille ne convergent pas vers un même foyer.

Visible et infrarouge : une même nature

Le concepteur de télescopes qu'était Herschel en a tout de suite saisi la portée : si la lumière et la chaleur radiante ont les mêmes propriétés optiques, si elles présentent le même comportement dans leurs interactions avec la matière, cela n'indiquerait-il pas qu'elles sont une seule et même entité ? Cette question domina la réflexion et les travaux de Herschel : neuf jours seulement après avoir écrit son premier article et dix jours avant de le présenter officiellement, il en écrivit un autre plus court pour la *Royal Society*, intitulé « Expériences sur la réfrangibilité des rayons invisibles du Soleil ».

Notons que ce titre fait écho à Newton. En effet, dans l'*Optique* de Newton (1704), un théorème est intitulé « La lumière du Soleil est constituée de rayons différemment réfrangibles ». Newton a beaucoup influencé Herschel. L'approche de ce dernier est presque identique aux expériences de Newton avec un prisme placé sur une fenêtre pour projeter des couleurs sur un

mur. Herschel a repris la méthode qualitative de Newton pour visualiser le spectre et l'a transformée en un instrument quantitatif. Il avait peut-être le sentiment (justifié) de poursuivre les travaux que Newton avait entrepris avec les couleurs de la lumière en étendant le concept de « réfrangibilité différente » aux rayons du Soleil se trouvant au-delà des couleurs visibles.

Herschel reprit sa première expérience et mesura la température dans les zones sombres au-delà du rouge. Il utilisa la position des couleurs visibles comme référence pour noter ses points de mesure dans l'infrarouge.

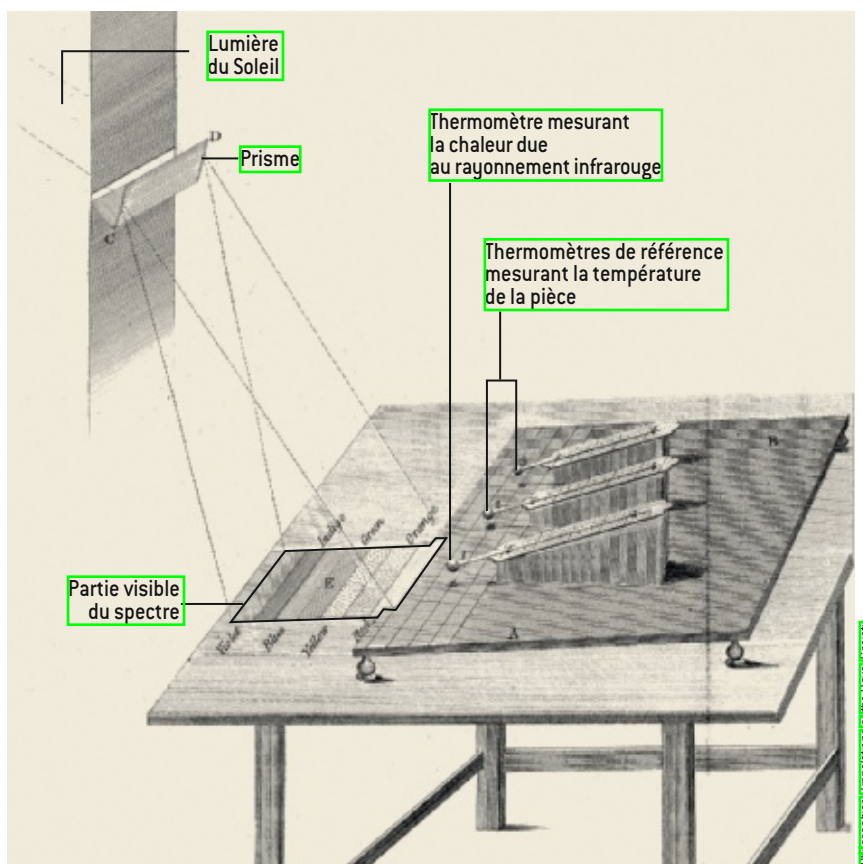
Il releva avec son thermomètre une température qui augmentait jusqu'à atteindre un maximum, puis diminuait. Le ton du deuxième article de Herschel traduit beaucoup d'excitation et de confiance dans sa

L'AUTEUR

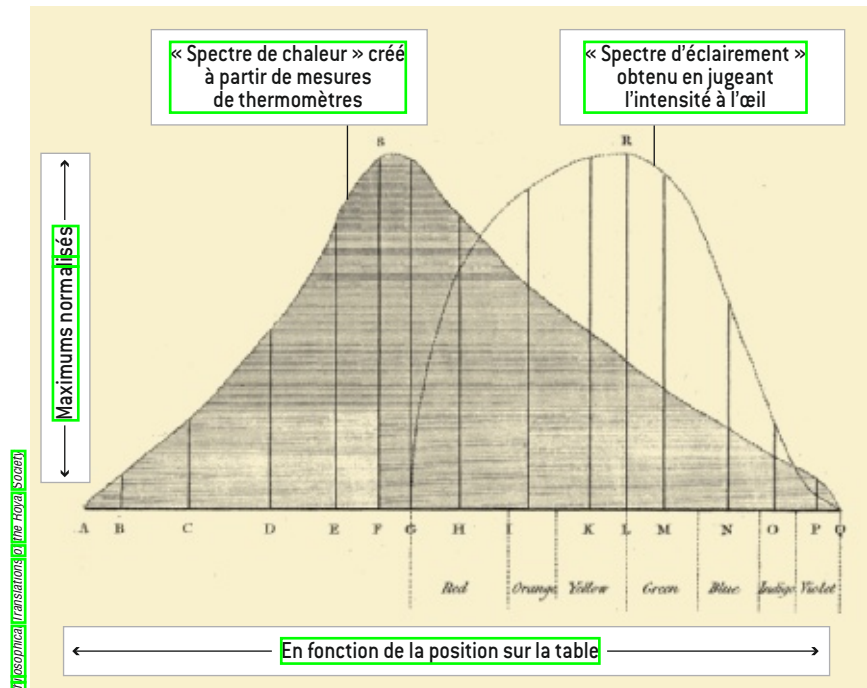


Jack WHITE a été directeur du Groupe de mesures infrarouges avancées pour le Département de la défense des États-Unis. Il travaille aujourd'hui comme conseiller pour l'analyse de données radiométriques infrarouges.

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



4. L'EXPÉRIENCE DE HERSCHEL met en jeu un prisme, qui décompose la lumière du Soleil, et un thermomètre, qui mesure la température pour différentes couleurs spectrales. En modifiant son spectroradiomètre, l'astronome mit en évidence qu'un rayonnement invisible était source de chaleur. Le dessin du dispositif est tiré de son deuxième article. L'expérience a montré que la chaleur radiante a les mêmes propriétés optiques de réfraction que la lumière.



Philosophical Transactions of the Royal Society

5. LE DERNIER ARTICLE DE HERSCHEL concernant l'infrarouge, en 1800, présente le graphique montrant les distributions spectrales de la lumière visible et de la chaleur radiante (le « spectre d'éclairement » et le « spectre de chaleur »). L'association trompeuse de ces deux courbes a conduit Herschel à conclure à tort que la lumière visible et la chaleur radiante sont de natures différentes.

découverte. Dans toutes ses expériences, il avance rarement des opinions qui ne soient pas solidement étayées par les données, mais il termine cet article par un argument de nature philosophique :

« Pour conclure, si nous nommons lumière ces rayons qui éclairent les objets, et chaleur radiante ceux qui chauffent les corps, on peut se demander si la lumière est différente en essence de la chaleur radiante. En réponse à quoi je suggérerais que les règles de la philosophie ne nous autorisent pas à admettre deux causes différentes pour expliquer certains effets, s'il est possible de les expliquer par une seule. »

La réputation de Herschel en tant qu'astronome contribua probablement à assurer à ses articles une réception favorable par la plupart des scientifiques, mais pas par tous. Son troisième article s'ouvre sur une note résolument défensive. Herschel y répond à la critique d'une personne, un « auteur célèbre », qui s'est offusquée de l'expression « chaleur radiante ». Ce détracteur

pourrait avoir été John Leslie, qui était considéré comme un expert de la chaleur et qui supportait mal l'irruption d'un amateur dans son domaine. Dans une lettre publiée dans *A Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts* de William Nicholson, Leslie écrivit :

« Il semblerait que cet astronome compétent, en abordant une nouvelle voie de recherche, n'ait pas utilisé l'appareillage adapté à la subtilité du sujet, ni ne se soit suffisamment prémuni contre les nombreuses sources cachées d'erreurs. Je me considère habilité à parler avec la plus grande confiance parce que j'ai longtemps dirigé mes recherches dans la même voie [...]. Je n'hésite donc pas à affirmer que la proposition capitale de Dr Herschel est le fruit d'observations fallacieuses [...]. Et quels que soient mes sentiments concernant la validité des conclusions, j'ai résolu de soumettre calmement et impartialement les prétendus faits à l'épreuve de l'expérience. Quand un photomètre a été placé

au-delà du spectre, [...] pas le moindre effet n'a été perçu. »

Si, comme le prétendit Leslie, son thermomètre différentiel [qu'il appelait « photomètre »] n'a trouvé aucune chaleur au-delà du visible, c'est qu'il était défectueux. Ce point allait bientôt être prouvé de façon spectaculaire par des expériences indépendantes conduites par la *Royal Society*. La nature de la chaleur faisait partie des principaux sujets discutés par les physiciens ; pour ne pas attirer d'autres critiques, Herschel remplaça le terme de « chaleur radiante » par « les rayons qui provoquent la chaleur ».

Oppositions malvenues

L'opposition que Herschel rencontra ne ralentit pas ses expériences, mais ces attaques ont peut-être eu un impact important : dans la seconde partie de son article final, présenté le 6 novembre 1800, Herschel ne mit plus l'accent sur la recherche de preuves de similitude entre la lumière et la chaleur radiante, mais sur les éléments qui les différencient.

Herschel se lança dans un vaste programme de construction d'instruments pour examiner et mesurer chaque propriété. Aux prismes et thermomètres à mercure initiaux, il ajouta diverses lentilles et miroirs dans une douzaine de configurations différentes et une panoplie de matériaux transparents pour comparer la transmission.

En plus de 200 expériences, il confirma, de chaque façon qu'il lui était possible de tester, que la lumière et la chaleur radiante ont les mêmes propriétés optiques. Mais du fait qu'il cherchait les différences plutôt que des ressemblances, il passa à côté de certaines relations ou les interpréta de façon erronée.

Par exemple, il mesura les effets de la diffusion et trouva que le rayonnement diffuse davantage dans l'infrarouge. Ce qui est exact, car la diffusion dépend de la longueur d'onde. Mais Herschel attribua ce résultat à une nature différente de la lumière et de la chaleur, plutôt que d'y voir des signes d'un comportement similaire lors de leur interaction avec la matière, laquelle interaction diffère en intensité selon qu'il s'agit de la lumière ou de l'infrarouge.

Herschel ne comprenait pas vraiment les causes de ces phénomènes, et il avait une capacité limitée à formuler mathématiquement ses découvertes. Ses atouts étaient la connaissance pratique de l'optique, combinée à son habileté en matière de fabrication d'instruments et ses talents d'observateur.

Son dernier article, présenté le 6 novembre 1800, contient le premier graphique représentant les distributions spectrales de la lumière visible et du rayonnement infrarouge (voir la figure 5). Il nomma ces courbes le « spectre d'éclairement » et le « spectre de chaleur ». Sur l'axe vertical, Herschel reporta la température mesurée et la luminosité perçue. Il leur fixa des maximums égaux afin de comparer l'étendue relative et la forme des distributions ainsi que la localisation de leur maximum. Pour l'axe horizontal, la notion de longueur d'onde étant encore inconnue, il utilisa la distance par rapport à l'endroit où les couleurs visibles éclairaient la table. Cet axe est inversé par rapport à la convention actuelle, qui consiste à représenter les longueurs d'onde croissantes de gauche à droite.

Un graphique trompeur

Le graphique de Herschel est le produit de son imagination, de son intuition et de mois de travail laborieux, mais il était trompeur. Son allure générale est sans doute le facteur décisif qui le conduisit à conclure que la lumière et la chaleur radiante sont, après tout, fondamentalement différentes.

La représentation des données peut influencer sur leur interprétation. Même aujourd'hui, il est difficile d'examiner le graphique de Herschel sans avoir l'impression que la lumière et la chaleur radiante sont deux entités distinctes. Les courbes de Herschel sont toutes deux exactes, mais elles correspondent à des quantités différentes et presque sans rapport, et ne devraient pas être représentées ensemble. Son erreur ne vient pas de ses données de base, mais du fait qu'il supposait les courbes comparables.

L'un des éléments manquants pour l'interprétation des courbes, et qui était un concept inconnu en 1800, est l'effet de la réponse du détecteur. La mesure réalisée

par tout instrument ou détecteur, y compris l'œil, résulte du produit de deux courbes : la distribution de la puissance reçue, et la courbe de réponse de l'instrument. Herschel supposait que le spectre mesuré représentait directement la distribution du rayonnement, sans imaginer que l'œil déformait ce signal par sa réponse.

Tout spectre créé à partir de ce que l'œil enregistre s'annule en dehors des limites de la vision. À l'intérieur de ces limites, la puissance reçue à n'importe quelle longueur d'onde est pondérée par la sensibilité de l'œil à cette couleur. Le pic de sensibilité, comme Herschel l'a correctement déterminé, est le jaune-vert à une longueur d'onde de 0,555 micromètre.

Par conséquent, le spectre d'éclairement de Herschel est davantage une carte de la façon dont l'œil répond aux couleurs que de la distribution de la lumière. Il voyait dans la forme de sa courbe une preuve que la lumière n'est pas également répartie sur le spectre. Son hypothèse était correcte, mais ses données ne le montraient pas. Il aurait obtenu une courbe pratiquement identique même si la distribution avait été uniforme.

En novembre 1800, Herschel est arrivé au bout de ce qu'il était possible de réaliser avec les connaissances et les techniques de son époque. Il retourna sans hésitation à son domaine de prédilection : l'astronomie.

L'apparence trompeuse de son graphique et les différentes sensations que sont la vision de la lumière et la sensation de chaleur l'ont finalement emporté sur ses données soigneusement recueillies, l'amenant à conclure que les deux énergies ne sont pas une seule et même grandeur physique.

Néanmoins, notre compréhension actuelle du rayonnement électromagnétique s'est développée à partir des mesures simples de température que Herschel a réalisées dans la lumière solaire. Elle s'est poursuivie avec l'unification du spectre par James Clerk Maxwell en 1861 et la formulation de la théorie quantique au XX^e siècle. Herschel ne pouvait pas prouver de façon concluante que la lumière et la chaleur radiante sont de même nature, mais ses expériences ont apporté des indices que d'autres allaient compléter pour résoudre l'énigme. ■

Le télescope spatial Herschel

L'Agence spatiale européenne a lancé en 2009 un télescope spatial nommé *Herschel* en l'honneur de l'astronome. Cet instrument observe le rayonnement infrarouge dans l'Univers. Il permet d'étudier la formation des nouvelles étoiles et l'évolution des galaxies. L'image ci-dessous est un nuage moléculaire (en fausses couleurs) au sein duquel se forment des étoiles.



WASA/Herschel

BIBLIOGRAPHIE

J. Heilbron, *Weighing imponderables and other quantitative science around 1800*, *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 24, pp. 127-131, 1993.

D. J. Lovell, *Herschel's dilemma in the interpretation of thermal radiation*, *Isis*, vol. 59(1), pp. 46-60, 1968.

W. Herschel, *Experiments on the solar, and on the terrestrial rays that occasion heat*, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 90, pp. 293-326 et 437-538, 1800.

W. Herschel, *Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the Sun*, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 90, pp. 284-292, 1800.

LOGIQUE & CALCUL

L'homme, meilleur joueur que la machine

Grâce à de nouvelles méthodes de coordination, l'intelligence humaine produit parfois des résultats supérieurs à ceux des programmes informatiques.

Jean-Paul DELAHAYE

En mai 1997, le lendemain de la victoire de l'ordinateur *Deep Blue* sur Gary Kasparov, le quotidien français *Libération* titrait « L'homme est-il foutu ? » Aux échecs, l'ordinateur bat aujourd'hui le meilleur humain et cela semble irréversible. Cette supériorité de la machine concerne de nombreux autres jeux dits de stratégie. En fait partie le jeu de dames anglaises, pour lesquelles l'ordinateur sait calculer des stratégies optimales, c'est-à-dire définitivement imbattables, ce qu'il ne sait pas faire dans le cas des échecs où les programmes jouent bien, mais d'une façon perfectible (voir l'article de cette rubrique de janvier 2008).

Cependant, le champion humain reste meilleur que la machine au jeu de go. Le niveau « sixième dan » atteint en 2012 par le programme *Zen19D* a inquiété des professionnels, mais il ne fait pas de l'ordinateur un égal de l'homme à ce jeu.

Moins attendu, l'ordinateur *Watson* d'IBM a battu l'être humain en 2011 au jeu *Jeopardy* (du type *Questions pour un champion*), dont on pensait que la nature non combinatoire et fondée sur des énigmes linguistiques exigeait des connaissances générales et une intelligence hors de portée des machines. L'ordinateur a montré que l'intelligence artificielle progresse même là où certains pensaient qu'elle resterait bloquée. Bien sûr, la base de données de 15 téraoctets de *Watson*, qui lui donne accès instantanément à une quantité colossale d'informations, a contribué au

succès de l'ordinateur et s'il a gagné, c'est en utilisant des algorithmes de traitement du langage naturel très différents des procédures du cerveau humain. Comme aux échecs, la machine gagne, mais elle n'imité pas.

L'ordinateur progresse aussi dans la résolution d'autres tâches où sa logique binaire semblait le handicaper. Il y a la résolution automatique des mots-croisés, où le programme *Dr Fill* approche les meilleurs joueurs humains. Pour la conduite automobile, les progrès sont tels que dans certains États américains, des autorisations ont été accordées pour que des systèmes automatisés de conduite circulent sur les routes au milieu des autres véhicules... à la condition qu'ils soient surveillés par un humain pouvant reprendre le contrôle à tout instant.

Or de nouvelles méthodes d'utilisation et de coordination de l'intelligence humaine produisent des résultats étonnants, et même des renversements inespérés ! Plusieurs problèmes dont la nature combinatoire semblait déterminer une implacable victoire de la machine sur l'humain voient celui-ci produire de meilleures solutions que les algorithmes les plus perfectionnés fonctionnant sur les plus puissants des systèmes.

À la condition de transcrire les problèmes sous de bons formats (ce que l'on fait avec l'ordinateur), les cerveaux humains sont dans ces cas de meilleurs calculateurs que les ordinateurs. L'indispensable présentation sous la forme de jeu, et les interfaces informatiques graphiques complexes pour

que l'intelligence ludique des humains produise ces prouesses, suggèrent que c'est l'association ordinateur-humain qui résout les problèmes posés. Une telle analyse serait injuste, car l'ordinateur n'est qu'un serviteur qui présente les données, exécute les commandes de manipulation formulées par le joueur humain, et évalue s'il progresse vers la solution ou l'atteint : toutes les décisions sont prises par le joueur.

Plier des protéines

La connaissance de la suite linéaire des nucléotides d'une séquence génétique codant une protéine, une suite de lettres prises parmi A, C, T et G, détermine la séquence des acides aminés qui composent la protéine et son repliement en trois dimensions. Cette forme dans l'espace détermine les parties actives de la molécule et comment la protéine interagit avec les autres molécules. Connaître ce repliement est donc essentiel au biologiste. En première approximation, c'est un problème de minimisation d'énergie, mais les degrés de liberté sont si nombreux (plusieurs dizaines, parfois beaucoup plus) que la détermination du bon repliement est extrêmement difficile ; les programmes informatiques spécialisés n'y réussissent aujourd'hui qu'assez médiocrement.

Un programme interactif en ligne dénommé *Foldit* (« Replie-le ») a été développé conjointement par le *Center for Game Science* de l'Université de Washington et le

Département de biochimie de la même université. Ce programme, que l'on télécharge facilement (<http://fold.it/portal/>), propose des énigmes de repliement. Une molécule dessinée en trois dimensions est affichée à l'écran, et le joueur peut alors la faire tourner, en examiner les parties de près et en manipuler les diverses composantes. Il est donc en mesure de la replier en essayant de faire au mieux. Le joueur est guidé par des informations diverses, dont bien sûr le niveau d'énergie qu'il doit minimiser. Il peut revenir en arrière, agiter aléatoirement la molécule, en figer certaines parties, etc. Il n'est pas nécessaire de connaître la biochimie pour tenter sa chance, car ce qui est

important sera appris par des exercices d'introduction et de découverte. Le but d'un joueur est d'améliorer l'énergie du meilleur repliement connu.

Le programme *Foldit*, qui fonctionne depuis 2008, a aujourd'hui été utilisé par 240 000 joueurs enregistrés. Les meilleures structures produites par les joueurs sont mémorisées, examinées et testées par les experts du domaine. Pour obtenir de bons résultats, les joueurs sont incités à se grouper en équipes. Des tableaux de meilleurs scores sont maintenus à jour, et diverses formes de compétitions entre joueurs et équipes accroissent les motivations des participants.

En 2011, une équipe de joueurs dénommée *Contenders* a donné la forme exacte de la protéase d'un rétrovirus responsable d'une des formes du sida chez le macaque rhésus. Il s'agissait d'un problème non résolu depuis une quinzaine d'années. La solution de l'équipe *Contenders* a été publiée dans la revue *Nature Structural and Molecular Biology*. Le nom de l'équipe apparaît comme auteur de la publication parmi les autres chercheurs ayant travaillé sur le projet *Foldit*. Le repliement découvert aidera peut-être à la mise au point de nouveaux antiviraux s'appliquant au sida humain.

Le jeu a aussi été utilisé pour modifier des protéines et améliorer leur efficacité

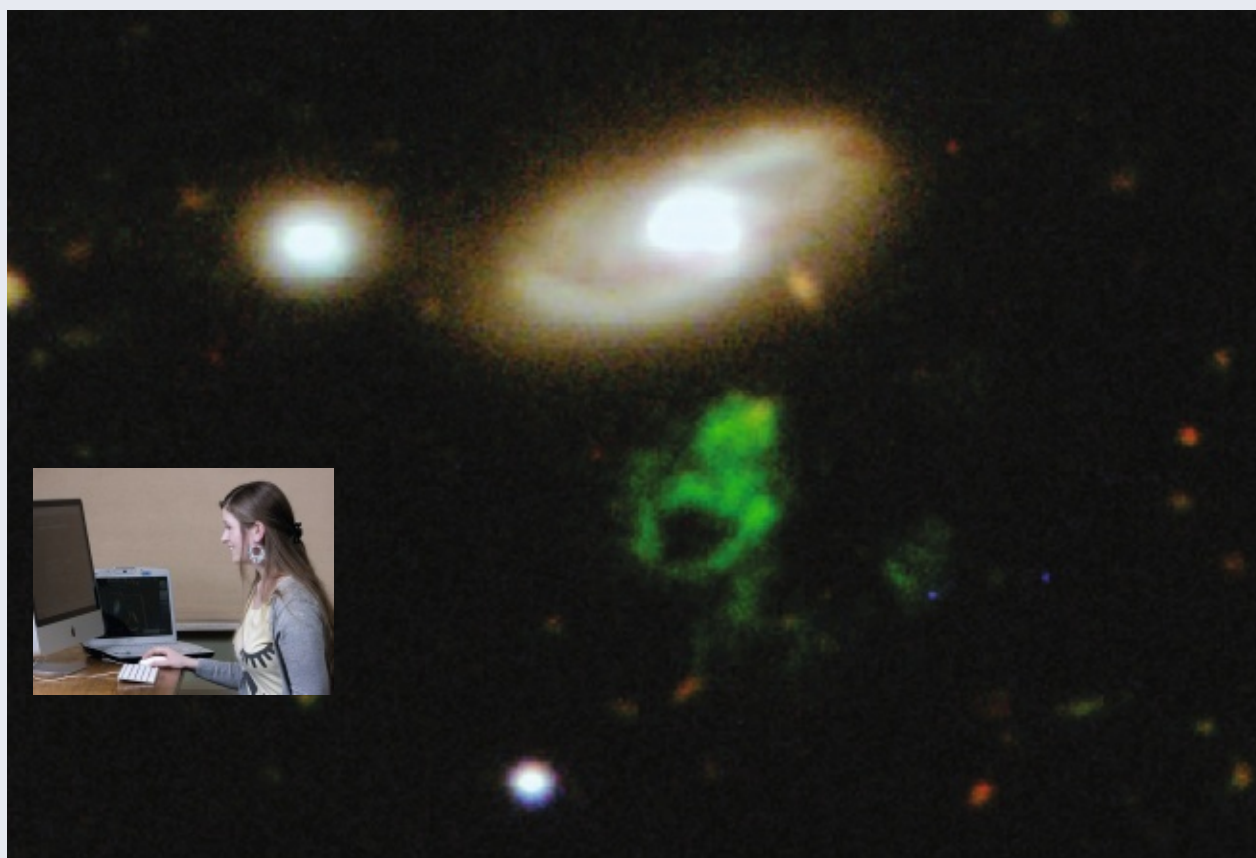
1. La grenouille de *Galaxy Zoo*

Les données recueillies par le télescope spatial *Hubble* sont trop nombreuses pour être traitées par les astronomes et trop complexes pour que la classification des galaxies soit

faite par un algorithme. Seul le recours à l'intelligence des bénévoles permet de mener le travail de classification nécessaire et rend disponibles aux chercheurs des données

scientifiques importantes (projet *Galaxy Zoo*). Durant ce travail de fouille des données portant sur des millions de galaxies, un étrange objet a été repéré par une internaute néerlandaise

prénommée Hanny (à gauche). L'objet, ici représenté en fausse couleur verte, a été nommé *Hanny's Voorwerp*. Il suscite conjectures et spéculations chez les astronomes.



VRS 2 UNIVERSITÉ 14/2013 15/03/13 12:12

2. Le jeu *Foldit*



Un joueur dispose à chaque instant d'une information sur le score (c'est-à-dire l'énergie qu'il faut minimiser) de la configuration moléculaire affichée. Pour améliorer ce score, le joueur a le choix entre plusieurs types d'actions sur la molécule à replier : saisir un élément de la molécule et le déplacer ; secouer (le squelette, les chaînes, ou tout) pour voir si cela améliore le score ; disposer quelques élastiques ou en enlever, ce qui aide à mieux contrôler la structure, etc. Un cahier de « recettes » (à gauche sur le côté) est aussi à sa disposition : chaque recette est une succession d'actions prédéfinies dont l'exécution a été reconnue efficace.

Étonnamment, les joueurs et les équipes de joueurs réussissent souvent à mieux replier les molécules que les meilleurs algorithmes spécialisés.

dans une fonction donnée. En janvier 2012, une enzyme qui catalyse la réaction dite de Diels-Alder a ainsi été perfectionnée, augmentant sensiblement son efficacité. Selon Seth Cooper, coordinateur de ce travail, « les gens possèdent des facultés naturelles de raisonnement spatial que les ordinateurs n'ont pas encore ».

Découvrir aussi des algorithmes

Récemment, les mécanismes de jeu du programme *Foldit* ont été complétés pour que les joueurs ou groupes de joueurs puissent définir des méthodes de repliement générales, autrement dit des algorithmes, et puissent les échanger, les copier et les faire évoluer. Ces « recettes » évolutives et en compétition ont amené de fécondes interactions et conduit à 5 400 propositions résultant de combinaisons de recettes élémentaires et de modifications variées des meilleures recettes trouvées précédemment. Deux recettes eurent un succès particulier auprès des joueurs. On remarqua alors des similitudes entre les deux méthodes et un algorithme récemment mis au point par des spécialistes de la programmation du repliement des protéines. Cet algorithme dépasse les meilleurs algorithmes publiés.

Les auteurs de l'article où est décrite cette découverte concluent que « les jeux scientifiques en ligne, non seulement résolvent des problèmes difficiles, mais

découvrent et formalisent des algorithmes nouveaux et efficaces ».

Ainsi, des joueurs utilisant leurs facultés naturelles de manipulations d'objets en trois dimensions et leur bon sens battent les meilleurs algorithmes et en conçoivent de nouveaux d'une complexité et d'une efficacité équivalentes à ceux que les spécialistes imaginent. Certes, les joueurs qui ont participé à ces expériences sont nombreux et, pris dans l'excitation de la compétition, certains ont consacré beaucoup de temps, d'énergie et d'ingéniosité pour arriver à ces exploits.

On ne peut s'empêcher de penser que les milliards d'heures perdues dans le monde à jouer à toutes sortes de jeux informatiques deviendraient utiles si plus de jeux scientifiques de cette nouvelle catégorie étaient pratiqués... Zoran Popovic, le directeur du *Center for Game Science*, énonce un objectif audacieux : « Notre but ultime est que toute personne puisse jouer et soit donc en mesure de gagner un prix Nobel. »

Un autre problème difficile de biologie computationnelle est celui de l'alignement multiple des séquences de molécules biologiques de type ADN, ARN ou protéines. On cherche à disposer ces séquences les unes sous les autres, de manière à ce qu'apparaissent les régions similaires et que ces zones de concordance soient, autant que possible, les unes sous les autres. On utilise des programmes qui maximisent le nombre de coïncidences entre les séquences. L'introduction de trous (c'est-à-dire de ruptures

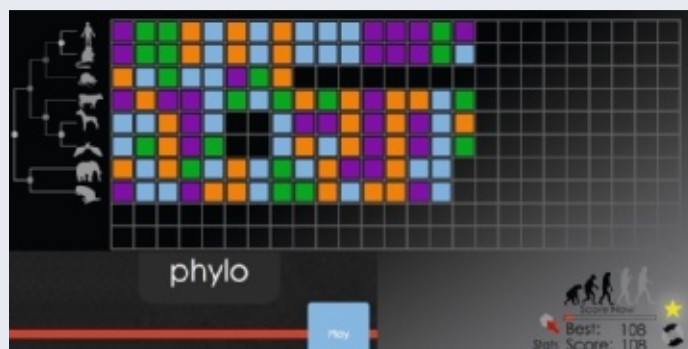
dans les séquences) est permise. Le résultat final est représenté par un tableau noté de la manière suivante : (a) deux séquences ayant un élément en commun au même endroit confèrent un point ; (b) si, en un endroit donné, deux séquences diffèrent, cela retire un point à la note du tableau ; (c) l'introduction d'un trou coûte cinq points et l'agrandissement d'un trou déjà existant en fait perdre un.

Les règles étant fixées, le calcul du meilleur alignement ne serait qu'une routine : en essayant tous les alignements possibles (en nombre fini) et en les notant tous, on déterminerait celui obtenant la meilleure note. Malheureusement, ce problème simple à énoncer est « complexe » à résoudre et aucun moyen algorithmique efficace n'est connu, car il appartient à la classe des problèmes NP-complets, classe de problèmes que personne ne sait traiter en temps raisonnable quand la taille des données augmente.

L'alignement des séquences est important pour déterminer la fonction des protéines et la phylogénie. L'alignement sert à identifier les zones fonctionnelles des protéines qui sont bien conservées lors de l'évolution et correspondent donc aux parties bien alignées des tableaux. Lorsqu'on détecte l'homologie d'une protéine A avec une protéine B de fonction connue, l'alignement suggère les fonctions de la protéine A.

Une seconde utilité des alignements multiples est liée à la recherche des parentés

3. Le jeu *Phylo*



Le programme *Phylo* transforme en jeu le problème de l'alignement de séquences génétiques. Le joueur déplace des cases colorées pour obtenir le plus grand nombre de couleurs identiques en colonnes. Des grands alignements sont examinés par le programme qui y repère des zones susceptibles d'être mieux alignées. Ces zones sont traduites en puzzles colorés.

On présente au participant l'un de ces problèmes en réserve. S'il trouve un meilleur alignement, celui-ci est inséré dans le grand alignement dont a été extraite l'énigme. De nombreux alignements ont ainsi été perfectionnés grâce aux joueurs qui, comme dans le cas de *Foldit*, obtiennent par leurs capacités visuelles et leur intelligence des résultats supérieurs à ceux des algorithmes.

entre espèces : quelle espèce a un ancêtre commun proche avec telle autre, et comment les espèces ancestrales se disposent-elles en arbre [équivalent aux arbres généalogiques] ? Un alignement multiple entre éléments d'une famille de protéines aide à calculer l'arbre phylogénétique le plus probable entre les protéines, qui est aussi un arbre reliant les organismes porteurs des protéines alignées. Les phylogénies ainsi reconstituées sont d'autant plus exactes que les alignements sont précis et optimaux. Toutes sortes d'algorithmes sont utilisés, complétés, perfectionnés et mis en commun par les chercheurs pour calculer des alignements multiples et en déduire des arbres phylogénétiques.

Alexander Kawrykow et ses collègues du Centre de bio-informatique de l'Université McGill à Montréal, inspirés par *Foldit*, ont mis au point un programme interactif nommé *Phylo* (<http://phylo.cs.mcgill.ca>) qui transforme les problèmes d'alignements multiples en jeux et propose à toute personne, même si elle n'a aucune connaissance de biologie, de rechercher de bonnes configurations. Des tableaux colorés sont affichés à l'écran et les joueurs les manipulent pour rechercher des alignements. Le programme indique à chaque instant la note du tableau affiché qu'il s'agit de faire progresser en déplaçant de petits carrés, dont il est inutile de savoir ce qu'ils représentent.

Encore plus facile à utiliser que *Foldit*, le programme *Phylo* s'est révélé d'une grande utilité. Les problèmes d'alignements soumis

aux utilisateurs concernent des séquences de taille limitée de façon à ce que l'œil humain s'y repère bien. Si un problème soumis à un joueur est résolu et obtient une note meilleure que celle de l'alignement connu au préalable (qui a été calculé par un algorithme rapide, produisant des alignements de qualité moyenne), alors l'alignement du joueur remplace celui qui était jusqu'alors enregistré dans la base de données.

Les organisateurs du jeu affirment que 70 pour cent des alignements soumis aux joueurs ont été améliorés et ont donc été remplacés par les résultats des joueurs humains. Après six mois de mise en place, le jeu avait attiré plus de 12 000 internautes qui avaient produit plus de 300 000 alignements variés. Comme le signalent les chercheurs de l'Université McGill, cela prouve à nouveau que le talent visuel des joueurs en ligne dépasse celui des algorithmes connus.

Une méthode d'avenir ?

Le programme *Phylo* et son usage sont gratuits. Un biologiste qui souhaite en bénéficier afin d'améliorer un alignement important pour ses travaux l'utilisera très facilement. Il suffit pour cela qu'il envoie l'alignement à améliorer à une adresse électronique donnée en respectant un format convenu ; le tableau sera transformé en jeu graphique et si les joueurs améliorent l'alignement initial, la solution graphique trouvée sera retraduite dans les notations

des biologistes, puis insérée là où il faut dans le grand alignement soumis, en même temps qu'il sera envoyé au chercheur à l'origine de la demande (voir la figure 3). Les méthodes de *Foldit* et de *Phylo* n'ont-elles d'intérêt que temporairement, ou permettront-elles longtemps à l'homme de battre la machine ?

Il paraît raisonnable de soutenir que dès qu'on aura mieux compris les problèmes, ou analysé comment travaille le cerveau humain et qu'on l'aura copié, ou encore dès qu'on disposera d'une puissance de calcul supérieure, alors le talent humain cessera de faire le poids face à la machine électronique, comme cela s'est produit pour le jeu d'échecs. *Foldit* et *Phylo* seront alors sans intérêt.

À l'inverse, on peut argumenter que les circuits neuronaux présents dans les aires visuelles du cortex sont le résultat d'une optimisation très fine après des dizaines ou centaines de millions d'années d'évolution ; en conséquence, ces circuits fonctionnent d'une manière extraordinairement subtile qui restera longtemps inaccessible à notre compréhension. Autrement dit, nous ne saurons pas programmer leurs mécanismes dans le silicium avant des lustres. En allant plus loin, on peut même imaginer qu'il sera impossible de comprendre dans le détail ce que font notre cerveau ou certaines de ses parties car, pour les comprendre, il faudrait y pénétrer et donc les détruire... Il est ainsi impossible de conclure aujourd'hui sur l'avenir de *Foldit* et de *Phylo*.

Transformer en jeu un problème scientifique réel et difficile est une belle idée mise en œuvre depuis peu, mais une idée proche l'a anticipée. Un groupe de chercheurs peut demander de l'aide à l'extérieur pour réaliser un travail qu'il n'arrive pas à effectuer seul, car cela exige trop de temps ou d'énergie. C'est ce qui s'est passé avec le projet *Galaxy Zoo*.

Des millions de galaxies

Pour comprendre la formation et l'évolution des galaxies, il est nécessaire de les classer selon leur forme et de disposer de nombreux exemples. Une classification sommaire distingue les galaxies spirales et les galaxies elliptiques. Un spécialiste disposant d'une image de galaxie indiquera assez rapidement son type et en classera quelques centaines sans se donner beaucoup de mal. La difficulté provient du nombre de galaxies que les chercheurs veulent prendre en compte (plusieurs millions), car il est important pour eux de

disposer de classifications aussi exhaustives que possible. Une première version du projet *Galaxy Zoo* (<http://www.galaxyzoo.org>) a permis, grâce aux internautes volontaires, de classer un million de galaxies. Les images provenaient d'une caméra numérique installée à l'Observatoire d'Apache-Point, au Nouveau-Mexique (États-Unis). Sans la mobilisation des 80 000 bénévoles, la caractérisation des 60 millions de galaxies repérées par le télescope spatial *Hubble* aurait été impossible.

Par ailleurs, lors de ces travaux d'observation et de classification, un objet étrange a été identifié par une internaute, Hanny van Arkel. L'objet, nommé *Hanny's Voorwerp*, est mystérieux et a suscité discussions et conjectures chez les spécialistes, prouvant à nouveau le bien-fondé d'un examen aussi exhaustif que possible, par des humains, des données astronomiques aujourd'hui disponibles en quantité... astronomique.

Si l'intelligence humaine réussit souvent mieux à calculer ou à classer que la machine, c'est que le problème a été bien traduit et mis en images pour que la recherche de sa solution devienne amusante ou très simple (dans le cas de *Galaxy Zoo*) grâce à un logiciel interactif mis en ligne et conçu dans ce but. Cela est possible depuis que les performances graphiques des ordinateurs de bureaux ont atteint les extraordinaires niveaux actuels.

Une autre raison du succès de ces méthodes est l'existence des réseaux informatiques et de la communication instantanée qu'ils permettent entre les organisateurs du travail et une multitude de joueurs potentiels dispersés dans le monde. Grâce à ces progrès technologiques, une masse importante de joueurs tente sa chance et fournit un travail irremplaçable. L'idée est de confier à une « foule » une tâche de calcul qu'on ne sait pas obtenir des machines et qu'un humain seul a peu de chance de mener à bien. L'intelligence humaine bat l'ordinateur dans ces exemples parce qu'elle s'est massivement mobilisée et coordonnée.

Cette idée de s'adresser au grand nombre pour obtenir ce qu'on ne réussit pas seul ou avec ses machines n'est pas

4. Karpov et Kasparov battent la foule

L'idée de confier à la foule une tâche trop difficile pour un être humain, et dont les exemples présentés dans l'article montrent qu'elle fonctionne souvent à merveille, a pu donner l'illusion que le *crowdsourcing* était apte à tout faire.

Il n'en est rien : dans un match sur Internet en 1996, Anatoli Karpov écrasa son adversaire, « Le reste du monde ». Toutefois, les coups étaient décidés à la majorité et certains joueurs

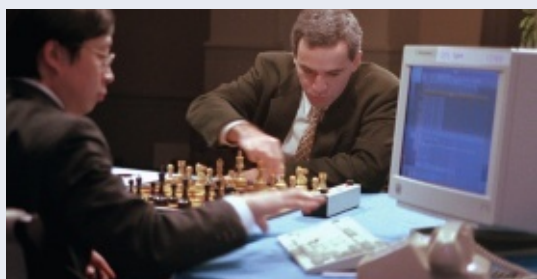
faibles votaient pour les mauvais coups.

Le match qui a été organisé en 1999 entre Gary Kasparov et « 50 000 bons joueurs » était plus difficile et a prouvé à nouveau que la foule, dans un tel cas, se fait battre par un individu seul. Alors que 50 000 personnes provenant de 75 pays différents et conseillées par quatre joueurs professionnels, dont Étienne Bacrot, collaboraient pour jouer et battre G. Kasparov en une fantastique

partie d'échecs, ce fut lui qui, en définitive, l'emporta après des échanges étendus sur 62 coups (voir www.chessgames.com/perl/chessgame?gid=1252350). Puisque l'ordinateur *Deep Blue* a battu G. Kasparov aux échecs, et que G. Kasparov a battu la foule, doit-on en conclure que, nécessairement, *Deep Blue* ou l'un de ses successeurs battrait lui aussi la foule ?

A. Karpov rejoua en juillet 2012 une partie majoritaire et gagna en 37 coups (www.europe-echecs.com/art/parte-majoritaire-contre-karpov-fin-de-la-partie-majoritaire-de-karpov-4421.html).

Ni les échecs ni la science ne sont démocratiques : ce n'est pas la majorité qui gagne. En science, le novateur a raison contre les habitudes de pensée de tous.



5. Le service reCAPTCHA

Pour certaines opérations, on vous demande de retranscrire quelques symboles mal écrits formant un mot. Le but est d'empêcher un programme de se substituer à vous et, par exemple, de créer massivement des comptes de courrier électronique. On suppose que seul un être humain peut traduire le dessin présenté en symboles. Comme ce sont des tests pour distinguer homme

et machine, tel celui qu'Alan Turing proposa en 1950, on les nomme CAPTCHA, de l'anglais *Completely Automated Public Turing Test to Tell Computers and Humans Apart*.

Une utilisation des CAPTCHA pour mettre en place un « crowd-computing » massif est pratiquée depuis plusieurs années. Le principe, nommé reCAPTCHA, consiste à demander à la personne qui s'au-

thentification pas une seule lecture de lettres brouillées, mais deux. Le premier mot sert à tester si l'on a bien affaire à un humain ; la seconde est une image tirée d'un document que les gestionnaires du reCAPTCHA veulent numériser et que les algorithmes de reconnaissance automatique de caractères ont repéré comme délicat ou totalement illisible. La seconde réponse de l'utilisateur permet de numériser le morceau incompréhensible, travail contrôlable par un autre utilisateur pour que la sûreté soit accrue. Ainsi sont traités des documents trop difficiles pour les numérisations automatiques. Le système est utilisé pour les archives du *New York Times*.



L'AUTEUR



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

A. Kawrykow et al., *Phylo : A citizen science approach for improving multiple sequence alignment*, *PLoS ONE*, vol. 7(3), e31362, 2012.

Kasparov versus the world, *Wikipedia*, 2012 : http://en.wikipedia.org/wiki/Kasparov_versus_the_World

S. Thomas, *9 examples of crowdsourcing, before crowdsourcing existed*, 2012 : <http://memeburn.com/2011/09/9-examples-of-crowdsourcing-before-crowdsourcing-existed/print/>

F. Khatib et al., *Algorithm discovery by protein folding game players*, *PNAS*, vol. 108(47), pp. 18949-18953, 2011.

F. Khatib et al., *Crystal structure of monomeric retroviral protease solved by protein folding game players*, *Nat. Struct. Mol. Biol.*, vol. 18, pp. 1175-1177, 2011.

C. Lintott et al., *Galaxy Zoo : Morphologies derived from visual inspection of galaxies from the Sloan Digital Sky Survey*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 389(3), pp. 1179-1189, 2008.

J. Howe, *The rise of crowdsourcing*, *Wired Magazine*, juin 2006.

J. Surowiecki, *The Wisdom of Crowds*, Anchor Books, 2004.

nouvelle. En 2006, Jeff Howe, rédacteur au magazine *Wired*, l'a nommée *crowdsourcing* (« externalisation vers la foule » ou « distribution du calcul à grande échelle »). Des exemples en dehors des sciences ont été mis en œuvre, dont un programme particulièrement étonnant, nommé reCAPTCHA, où les internautes participent à la validation des numérisations d'ouvrages et travaillent sans même en avoir conscience.

Quand la foule calcule

En réfléchissant à ce *crowdsourcing*, certains ont noté des utilisations anciennes du principe datant d'une époque où les ordinateurs n'existaient pas. Ainsi, le *Oxford English Dictionary* a été élaboré au milieu du XIX^e siècle avec l'aide de 800 volontaires qui copiaient des passages de livres, ce qui mit à la disposition des éditeurs un grand nombre de citations précises et une information fiable sur l'usage des mots et leur sens en langue anglaise. *Wikipedia* est bien sûr une forme de *crowdsourcing* et, bien qu'écrite par ceux qui le souhaitent, sa fiabilité n'est pas loin d'égaler celle des autres encyclopédies, tout en proposant une quantité d'articles bien supérieure à

la plus grosse des encyclopédies fondées sur le travail d'experts.

Notons toutefois que le fait de confier une tâche à un très grand nombre de personnes ne produit pas nécessairement des résultats meilleurs que ceux qu'on tire d'un individu isolé et compétent. L'exemple le plus spectaculaire d'un échec du *crowdsourcing* est donné par le match organisé en 1999 entre G. Kasparov et le reste du monde, constitué de 50 000 personnes provenant de 75 pays différents. Durant toute une partie qui s'étendit sur 62 coups, à raison d'un coup tous les deux jours, G. Kasparov affronta la foule des joueurs d'échecs du monde entier qui tentait de le battre. Malgré une organisation permettant aux bons joueurs de peser suffisamment dans les décisions collectives des coups à jouer, G. Kasparov gagna. La partie a été jugée l'une des plus importantes et des plus riches de l'histoire du jeu d'échecs, et un commentaire de 200 pages a été publié pour en analyser les nombreuses nouveautés et subtilités. Reste que la foule a perdu ! N'oublions pas non plus que la « sagesse des masses » a conduit aux plus grandes bulles spéculatives, à de multiples catastrophes économiques, et à l'avènement des pires dictateurs. ■

SCIENCE & FICTION

Alien : enquête sur un monstre culte de la SF

Alien concentre les traits les plus repoussants du règne animal.

Une bave abondante parfait le tableau.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

Le monstre du film *Alien*, réalisé par Ridley Scott en 1979, incarne l'effroi. Aujourd'hui encore, il fait la renommée du film, de ses suites et de ses nombreux « dérivés » (jeux vidéo, etc.). *Alien* a pour origine une créature imaginaire d'aspect phallique, créée par l'artiste suisse Hans Rudi Giger en 1976. Le style de la bête, vaguement humanoïde, osseux et tubulaire, s'inscrit dans un univers graphique sombre et anxiogène, mélangeant design métallique et lignes organiques. Arrêtons-nous sur ce monstre, probablement le plus terrifiant des extra-terrestres : que peut-on en dire en le voyant évoluer dans les films ? Quelles sont ses caractéristiques ? À quelles espèces terrestres ressemble-t-il ?

Dès les premières phases de son développement, *Alien* est repoussant. Tout commence par un œuf oblong et sombre, évoquant celui d'un dinosaure théropode (par exemple le *Tyrannosaurus rex*), sauf qu'il est recouvert d'une sorte de cuir gélatineux. L'espèce est ovipare, avec une larve capable de rester longtemps dans un œuf avant de se développer dans un organisme hôte : quand elle le repère, l'extrémité de l'œuf s'ouvre comme une fleur, et une énorme ventouse à huit pattes en jaillit. Elle saute au visage de l'hôte, en général un humanoïde qui tombe rapidement dans le coma. Ce *facehugger* (littéralement « qui étreint le visage »), disque muni d'appendices articulés et d'une queue élastique, présente une morphologie souvent comparée à celle des limules, bien que ces arthropodes marins présentent une queue rigide

et dix pattes. Les quatre paires d'appendices évoquent plutôt les arachnides, tels les scorpions, les araignées ou les acariens. En revanche, pour le reste du corps, le *facehugger* se rapproche plutôt d'un groupe méconnu d'échinodermes uniquement fossiles, les stylophores. Accroché à la face, le *facehugger* introduit une trompe dans la bouche de son hôte et pond un mini-alien dans la trachée.



1. **ALIEN, Le 8^e passager**, le premier film de la saga. L'affiche précisait : « Dans l'espace, personne ne vous entendra crier. » Ce qui, étant donné l'absence totale d'air susceptible de propager les sons, est tout à fait juste !

Une croissance accélérée

Après quelques heures, ce modèle réduit de l'adulte sort de l'hôte en faisant exploser sa poitrine, d'où son surnom anglophone de *chestbuster*. Le monstre atteint sa taille adulte de grand prédateur en quelques heures. Ce développement rapide et complexe rappelle celui des insectes : la plupart des parasitoïdes répertoriés sur Terre sont des hyménoptères, telles les abeilles, les guêpes ou les fourmis. Soulignons toutefois que la succession de formes fixes et libres est également une caractéristique du cycle des cnidaires (le groupe comprenant les méduses) et que la ventouse du *facehugger* évoque aussi la sangsue ou la lamproie.

L'*Alien* adulte concentre les caractéristiques les plus effrayantes des formes vivantes. Incontestablement humanoïde, il présente de nombreuses pointes, épines et tubes dorsaux, paraît couvert d'un revêtement peu classique dans le monde animal : ni peau de mammifères, ni écailles de reptiles, ni chitine d'invertébrés. La tête est originale. Avec cette longue excroissance

postérieure, il ressemble à un minuscule crustacé, *Phronima sedentaria*, connu sous le nom de « tonnelier de mer ». Et qu'y a-t-il à l'intérieur ? Un cerveau certainement. Mais cette excroissance pourrait aussi faire office d'organe d'équilibre, comme l'étaient les crêtes de dinosaures ou de ptérosaures (reptiles volants du Mésozoïque). À moins que cela ne soit un organe analogue au « melon » des cétacés, et qui contiendrait un liquide ou une graisse utile à leur communication ?

Alien semble ne pas avoir d'yeux, ce qui renforce le caractère terrifiant de ce super-prédateur. Ils sont vraisemblablement remplacés par d'autres organes des sens (ouïe et odorat, par exemple) hyperdéveloppés. L'absence d'yeux est une caractéristique des espèces cavernicoles ou souterraines, ce qui est bien le cas des Aliens qui creusent d'immenses « termitières ». La bouche est équipée de nombreuses dents pointues, qui ressemblent plutôt à des dents de reptiles : elles sont moins différenciées que celles des mammifères. Plus originale, sa mâchoire est extensible ou protractile, un atout pour attraper ou perforer les proies à distance, selon leurs tailles. Sur Terre, ce trait est présent chez de nombreux « poissons », requins en tête, mais aussi chez les larves de libellules. Enfin, Alien bave abondamment, ce qui le rend encore plus repoussant. Cette abondante salive est certainement utile pour lubrifier les proies qu'il engloutit. Elle serait aussi le réservoir de nombreuses bactéries, comme c'est le cas chez le varan de Komodo (*Varanus komodoensis*) dont les morsures sont souvent suivies d'une septicémie !

Le système sanguin d'Alien soulève aussi quelques questions intéressantes. Le seul sang rouge que voit le spectateur est celui des victimes humaines. Le sang d'Alien est de couleur jaune comme l'hémolymphe des insectes et il est tellement corrosif qu'il perce les alliages métalliques et brûle les tissus humains. Comment ses vaisseaux sanguins résistent-ils ? Sont-ils constitués à l'image de l'estomac qui devrait se digérer lui-même, le milieu qu'il contient étant si acide qu'il dégrade tout ce qui y arrive ? Alien sécrète peut-être ses propres substances antiacides



2. CE BUSTE D'ALIEN, monstre *horribilis*, révèle de nombreux détails anatomiques, par exemple sa double mâchoire extensible, très utile pour perforer la tête de ses proies.

qui préservent ses vaisseaux, à moins que les parois vasculaires ne soient constituées d'un matériau ultrarésistant dont les industriels aimeraient certainement connaître la composition ! Il est aussi possible que les caractéristiques du sang d'Alien changent au contact de l'air, quand il saigne. Mais comment ses blessures se cicatrisent-elles ?

Avec son instinct de tueur, Alien est aussi excellent coureur, grimpeur et sauteur. Principalement bipède plantigrade, ses jambes sont robustes et ses bras puissants, longs et fins. Ces derniers sont terminés par des mains gracieuses, aux doigts griffus et préhensiles. Chaque main a deux pouces opposables. Bien que le nombre de doigts varie en fonction des films, on en compte souvent six, les trois premiers étant symétriques des trois derniers. Quadrupède lorsqu'il court ou saute, Alien est aussi excellent nageur : dans l'eau, les membres collés au corps, le monstre ondule et se propulse à l'aide de sa puissante queue pointue, tel un crocodile. Cet appendice pointu peut aussi lui servir d'arme, comme chez certains dinosaures herbivores dont

la queue était munie de pointes ou d'excroissances osseuses.

Alien est également capable de longues apnées. Est-il doté de branchies ? Les films ne nous éclairent guère sur ce point. Le thorax d'Alien présente six paires de « côtes » ventrales. Apparemment flottantes, abritent-elles des poumons ? Plus intrigant encore, le dos de la bête est orné de deux grandes « tuyères », des sortes de pots d'échappement. S'agit-il d'un système respiratoire ? Manifestement Alien peut respirer le mélange gazeux présent sur Terre, celui embarqué dans les vaisseaux spatiaux ou encore sur les planètes en cours de « terraformation ». Peut-être a-t-il des branchies et des poumons, comme c'est le cas chez les dipneustes, ou « poissons à poumons ».

Pas étonnant que cette terrible chimère, à la fois reptile, insecte et arachnide, réveille nos phobies les plus ancestrales. ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay. Avec la participation de F. Moutou, ANSES.

ART & SCIENCE

Promenade géologique en *Terre du Milieu*

Le territoire qu'arpentent les héros de Tolkien dans ses romans

Le Seigneur des anneaux et Le Hobbit est décrit avec suffisamment de précision et de vraisemblance pour qu'on puisse en reconstituer l'histoire géologique.

Loïc MANGIN

L'écrivain et philologue britannique John Ronald Reuel Tolkien (1892-1973) est surtout célèbre pour deux œuvres littéraires, *Le Seigneur des anneaux* paru entre 1954 et 1957 et *Le Hobbit* (ou *Bilbo le Hobbit*) publié en 1937. Cette dernière raconte le voyage de Bilbo, un Hobbit (des individus petits et aux pieds poilus), accompagné d'un magicien et de 13 nains vers l'Erebor, un ancien volcan où un dragon garde un trésor. Les héros parcourent un territoire, la *Terre du Milieu*, qui est aussi le décor des aventures des personnages du *Seigneur des anneaux*.

En 1992, la précision, la minutie et le sens du détail de Tolkien ont permis à William Sarjeant (1935-2002), professeur de géologie à l'Université du Saskatchewan, au Canada, de reconstituer l'histoire géologique de la *Terre du Milieu*. Ses travaux sont fondés sur les informations recueillies dans les textes, ainsi que sur les cartes dessinées par le fils de Tolkien à partir des indications de son père et des peintures de Tolkien lui-même. Précisons qu'en 1967, Margaret Howes avait tenté une telle reconstruction géologique, mais elle n'avait pas convaincu les spécialistes. Ces derniers lui préféraient celle qu'a proposée Robert Reynolds, en 1974. Puis vinrent les travaux de Sarjeant.

Sarjeant distingue six plaques dans la *Terre du Milieu* (en vert sur la carte qu'il a dessinée, ci-contre), alors que Reynolds n'en

comptait que quatre. Les plus anciennes sont celles de Forlindon et d'Eriador dont la collision a entraîné la formation (on parle d'orogénèse) des Montagnes bleues (ou *Ered Luin* en Sindarin, une des langues qu'a forgées Tolkien pour ses œuvres). La plaque de Forlindon a ensuite subi une subduction et a été entraînée vers les profondeurs du manteau terrestre : seuls deux morceaux subsistent, les régions de Forlindon et de Harlindon, au Nord-Ouest. En se déplaçant vers le Nord, ces deux plaques ont créé

Le mithril, un minerai fictif, serait un alliage naturel de platine et de palladium.

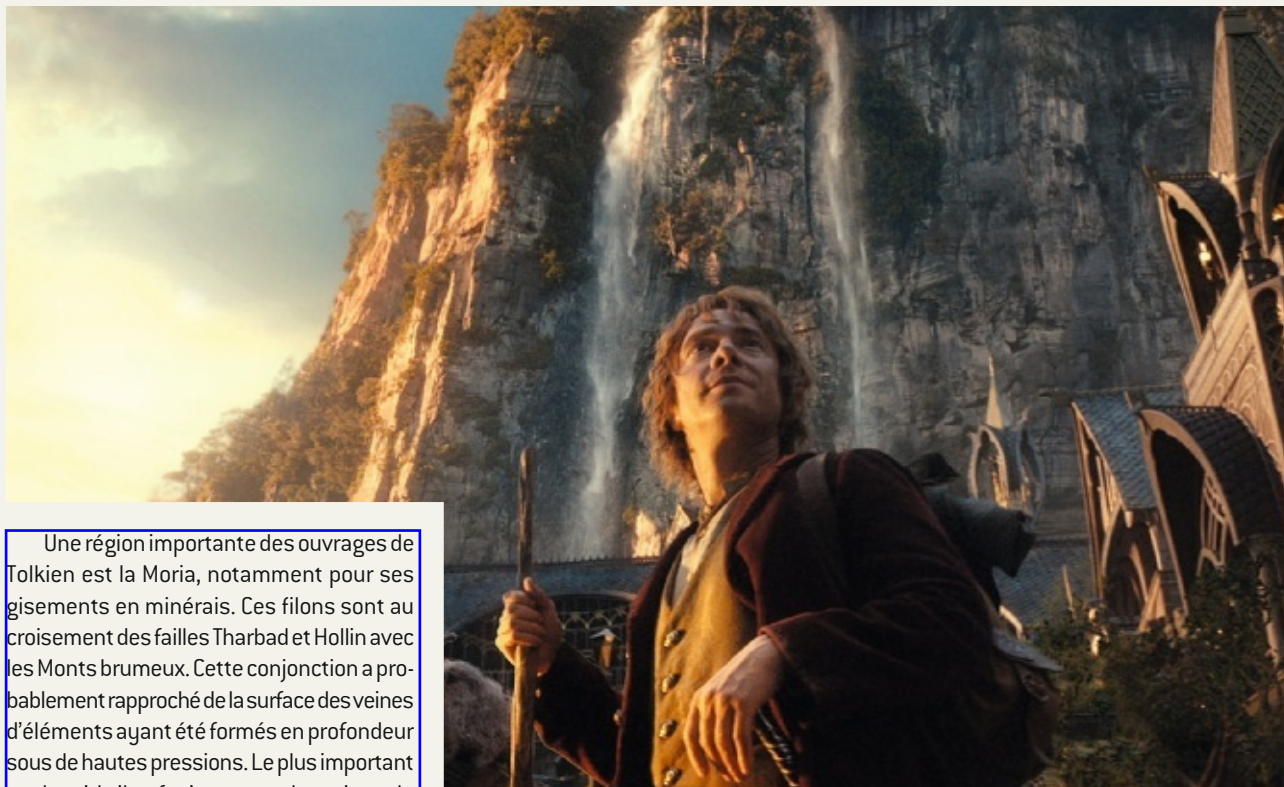
un réseau de failles normales (en rouge) sur lequel se superpose celui des rivières. Rappelons qu'une faille normale consiste en un plan incliné entre deux blocs de croûte terrestre le long duquel un glissement se traduit par un écartement des deux blocs.

Au Sud, la collision de la plaque Eriador avec celles de Rhovanion et de Harad a entraîné le soulèvement de montagnes, respectivement les Monts brumeux et les Montagnes blanches. Les trois plaques se rejoignent au niveau du craton de Rohan, un craton étant un bloc de croûte continentale. Au Nord, une autre jonction de trois plaques (Eriador, Rhovanion et Forodwaith) a eu pour conséquence l'érection d'un massif, les Montagnes grises.

L'événement géologique le plus « récent » en *Terre du Milieu* est la collision de la plaque Mordor avec celle de Harad, au Sud, et celle de Rhovanion, au Nord. La plaque est bordée au Nord et au Sud par des failles transformantes (ni subduction ni épanchement n'y ont lieu). Une conséquence majeure de ces mouvements est la création d'un rift, c'est-à-dire un fossé d'effondrement, où coule la rivière Anduin. Ce rift est bordé de failles normales.

L'activité volcanique a sans doute été importante par le passé, mais à l'époque où se déroulent les aventures narrées dans *Le Hobbit* et *Le Seigneur des anneaux*, elle est limitée à la plaque Mordor dont le déplacement a créé de nombreuses fissures propices aux épanchements de lave. Le bassin Udûn, au Nord-Ouest de Mordor, était vraisemblablement un volcan géant dont il n'est resté qu'une caldera après une énorme explosion du type de celle du Krakatoa en 1883.

Le seul volcan en activité dans cette région est le mont Doom (la Montagne du destin), là où se dénoue l'épopée du *Seigneur des anneaux*. Les trois autres sont le Dol Guldur, l'Orthanc et l'Erebor, la destination de Bilbo le Hobbit et de ses compagnons. Dans ce volcan, la grotte où se terre le dragon est sans doute un tunnel de lave. Ces cavités résultent d'abord d'un refroidissement en surface d'une coulée de lave, puis de l'arrêt de l'écoulement de la lave liquide circulant en dessous. On trouve de tels tunnels à Hawaï, à La Réunion, aux Açores, aux Canaries...

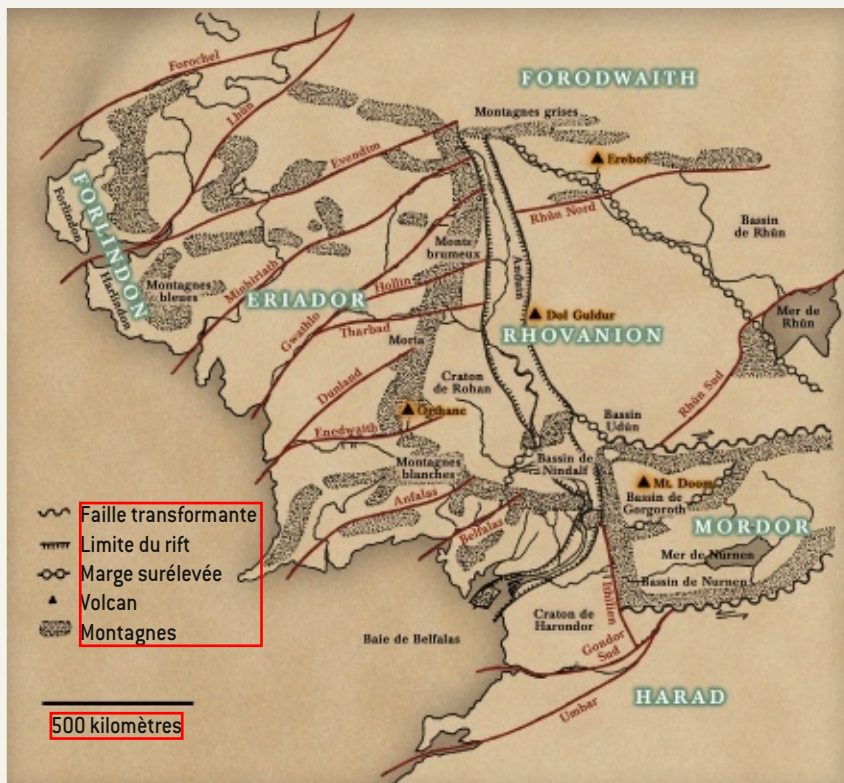


Une région importante des ouvrages de Tolkien est la Moria, notamment pour ses gisements en minerais. Ces filons sont au croisement des failles Tharbad et Hollin avec les Monts brumeux. Cette conjonction a probablement rapproché de la surface des veines d'éléments ayant été formés en profondeur sous de hautes pressions. Le plus important est le mithril enfoui au cœur des mines de la Moria. Ce matériau, fictif, est très léger et très solide : dans le *Seigneur des anneaux*, il compose une cotte de mailles tissée par les elfes ; dans le *Hobbit*, il est utilisé sous la forme d'un matériau étonnant, l'ithildin, qui n'est visible qu'à la lueur des étoiles et de la Lune. Selon Sarjeant, le mithril pourrait être un alliage de platine et de palladium.

Tolkien a apporté un soin particulier à l'univers qu'il a créé. Par exemple, pour le *Seigneur des anneaux*, il a inventé une dizaine de langues qui participent de la vraisemblance de l'ensemble. La *Terre du Milieu* est tout aussi cohérente d'un point de vue géologique !

Les adaptations cinématographiques du *Seigneur des anneaux*, entre 2001 et 2003, et du *Hobbit*, dont le premier des trois volets est sorti récemment sur les écrans, ont été tournées en Nouvelle-Zélande. Les paysages de ce pays sont-ils conformes à l'imagination de Tolkien et à l'histoire géologique de Sarjeant ? ■

W. Sarjeant, *The geology of Middle-Earth*, *Proceedings of the J. R. R. Tolkien Centenary Conference*, 1992.



IDÉES DE PHYSIQUE

Un saut en hauteur... de 39 kilomètres

Le parachutiste autrichien Felix Baumgartner a récemment réalisé un exploit en sautant d'un ballon à une altitude stratosphérique. Comment s'est déroulée cette mission ?

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Le 14 octobre 2012, s'élevant en ballon à 39 kilomètres d'altitude pour effectuer un saut en chute libre, l'Autrichien Felix Baumgartner quittait la troposphère, la première couche de l'atmosphère terrestre. Malgré le bleu nuit qui semblait entourer sa capsule et l'absence presque totale d'air, le parachutiste ne se trouvait pas encore dans l'espace. Il avait atteint la stratosphère, un environnement ténu, mais encore assez dense pour soutenir l'ascension du ballon et pour freiner assez rapidement la descente du parachutiste. Lors de ce saut remarquable, F. Baumgartner a notamment franchi le mur du son, bien que le mot « mur » ne soit pas tout à fait approprié.

L'altitude de 39 kilomètres est bien trop importante pour y accéder par avion. Le choix du projet *Stratos* s'était donc porté sur un vol en ballon gonflé d'hélium, comme pour les ballons-sondes météorologiques.

Mais alors que la masse de ces derniers instruments est de quelques dizaines de kilogrammes, elle est ici de l'ordre de 1 500 kilogrammes pour le passager, son scaphandre et, surtout, sa capsule.

Poussée d'Archimède contre poids et traînée

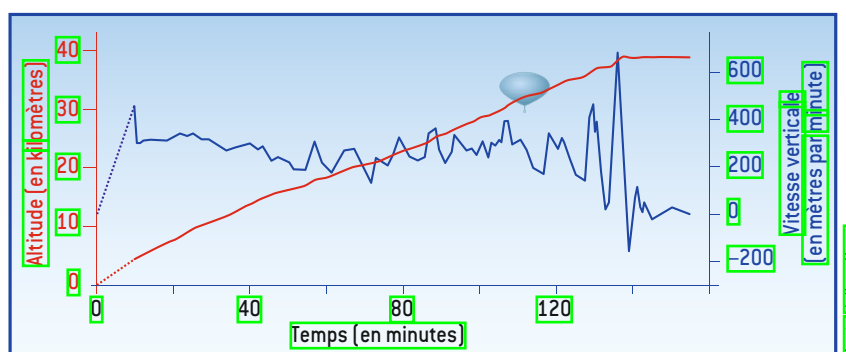
Pour que la poussée d'Archimède compense le poids de cet équipage, le ballon devait déplacer une masse d'air au moins aussi importante. Au niveau de la mer, où l'air a une masse volumique de 1,2 kilogramme par mètre cube, cela correspond à un volume d'au moins 1 250 mètres cubes, soit une sphère de 13 mètres de diamètre.

Qu'en est-il à 39 kilomètres d'altitude ? L'air y est si raréfié qu'il ne diffuse presque plus la lumière du Soleil et que l'espace environnant apparaît noir. Heureusement, on reste bien loin d'un vide spatial : la densité est d'environ

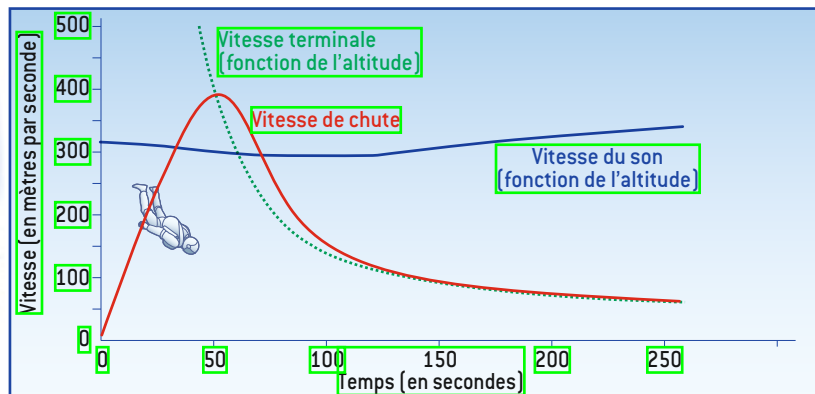
4,4 grammes par mètre cube, soit 270 fois moins qu'au niveau de la mer. Le volume d'air à déplacer correspond alors à une sphère d'au minimum 80 mètres de diamètre.

Il a donc fallu concevoir un ballon gigantesque, faisant 100 mètres de hauteur et 130 mètres de diamètre lors de son extension maximale (voir la figure 1). Pour ajuster son volume à la diminution de la densité avec l'altitude, il suffit de laisser faire la nature. En ne remplissant que partiellement le ballon, on s'assure que la pression interne est la même que celle de l'air extérieur : ainsi, lorsqu'on s'élève et que la masse volumique de l'air diminue, celle de l'hélium le fait dans les mêmes proportions.

L'hélium augmente ainsi de volume de façon que le produit du volume du ballon par la masse volumique de l'air, et donc la poussée d'Archimède, reste constant. En pratique, si l'on ajoute à la masse de l'équipage celle du ballon et de l'hélium,



1. L'ASCENSION EN BALLON de Felix Baumgartner a duré environ deux heures et demie. Malgré d'importantes fluctuations à la fin de la montée, la vitesse d'ascension est restée de l'ordre de 300 à 400 mètres par minute.



2. DANS LE SAUT EN CHUTE LIBRE DE FELIX BAUMGARTNER, la vitesse était initialement nulle. Elle a ensuite augmenté jusqu'à ce que la traînée aérodynamique devienne suffisamment intense pour freiner la chute. Puis la vitesse a diminué jusqu'à atteindre la

vitesse limite de chute [qui dépend de la densité de l'air, donc de l'altitude]. F. Baumgartner a, durant cette phase, dépassé la vitesse du son. Après avoir atteint la vitesse limite de chute, il a ouvert son parachute.

c'est plus de trois tonnes qu'il a fallu soulever. Pour assurer une vitesse d'ascension suffisante, le volume d'hélium utilisé était en fait de 5 100 mètres cubes, c'est-à-dire le double du nécessaire pour la sustentation.

Avec sa forme peu profilée, le ballon subit de plein fouet la traînée aérodynamique de l'air. Cette dernière est proportionnelle au produit du carré de la vitesse par la masse volumique de l'air et la section frontale du ballon. Soumis à son poids et à la poussée d'Archimède, le ballon accélère jusqu'à atteindre une vitesse telle que la traînée compense la force résultante.

Avec un diamètre initial de ballon d'environ 40 mètres [à en croire les photographies] et un coefficient de traînée égal à 1, on trouve une vitesse d'ascension de l'ordre de six mètres par seconde. Malgré la diminution de la masse volumique de l'air avec l'altitude, partiellement compensée par l'augmentation de la taille du ballon, cette vitesse d'ascension reste à peu près constante avant de s'effondrer lorsqu'on s'approche de l'extension maximale du ballon.

Au bout d'environ deux heures et demie d'ascension, parvenu dans la stratosphère, c'est le moment pour le parachutiste d'ouvrir la porte de sa capsule et de sauter. Comme lors de la montée, les forces mises en jeu sur lui sont le poids et la traînée [la poussée d'Archimède est très faible, l'air étant beaucoup moins dense que le parachutiste].

Dans les premiers instants de la chute, la traînée est négligeable par rapport au poids, qui est de l'ordre de 1 150 newtons. À cette altitude, en considérant un plongeon tête vers l'avant, la force de traînée, en newtons, vaut environ 6×10^{-4} fois le carré de la vitesse exprimée en mètres par seconde. On est donc pratiquement dans le cas idéal de la chute libre sans frottement : la vitesse croît proportionnellement au temps t écoulé, tandis que la distance parcourue est égale à $\frac{1}{2}gt^2$, où g est l'accélération de la pesanteur.

La vitesse de chute augmente, puis diminue

Les chiffres font frémir : au bout de 30 secondes, la vitesse est déjà de 300 mètres par seconde et plus de 4 kilomètres ont été parcourus. En l'absence d'atmosphère, F. Baumgartner atteindrait le sol au bout d'une minute supplémentaire, à la vitesse de 870 mètres par seconde !

En réalité, la vitesse de chute n'augmente pas indéfiniment. Sous le double effet de l'augmentation de la vitesse et de celle de la densité de l'air lors de la descente, la force de traînée croît très vite. La vitesse atteint un maximum de 373 mètres par seconde après environ 50 secondes, au moment précis où la traînée devient égale au poids. Ainsi, même à plus de 30 kilomètres d'altitude, où l'air

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>

SUR LE WEB

Sites de la mission Stratos : <https://www.redbullcontentpool.com/content/stratos>, <http://www.redbullstratos.com/>

Un blog contenant des estimations quantitatives : <http://theengineerspulse.blogspot.ca/2012/10/mechanical-analysis-of-baumgartners-15.html>

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

est 100 fois moins dense qu'au niveau du sol, la traînée n'est plus du tout négligeable.

Une fois atteint le maximum de vitesse, la traînée dépasse le poids et l'homme sauteur se met à décélérer assez fortement. Il faut attendre environ 2 minutes et 30 secondes, vers 10 kilomètres d'altitude, soit l'entrée dans la troposphère, pour que la traînée et le poids se compensent et que le sauteur atteigne sa vitesse limite de chute (autour de 60 mètres par seconde), comme tout parachutiste ordinaire !

Pour promouvoir cet exploit, on mentionne souvent que F. Baumgartner aurait franchi le mur du son : c'est tout à fait exact, mais aussi un peu trompeur. Dans un gaz donné, la vitesse du son ne dépend que de la température T . Plus précisément, dans l'air, elle est de l'ordre de $20 \sqrt{T}$ mètres

par seconde. A la température ambiante (20°C , soit 293 kelvins), on retrouve les 340 mètres par seconde bien connus. Paradoxalement, la vitesse du son diminue avec l'altitude dans la troposphère, puisque T chute, avant de remonter un peu dans la stratosphère : à 30 kilomètres d'altitude, elle n'est cependant que de 305 mètres par seconde.

Le mur du son a été franchi, mais il était mou

Il est donc incontestable que F. Baumgartner a franchi le mur du son (voir la figure 2). Cependant, la densité à ces altitudes demeure si faible qu'il est peu probable que cela ait créé une onde de choc notable, donc qu'il y ait eu une signature sonique importante.

Il est par ailleurs mentionné que ce saut pourra alimenter la réflexion sur les procédures de survie des astronautes lors d'un retour sur Terre : au lieu d'attendre la destruction de leur vaisseau spatial dans les hautes couches de l'atmosphère, ne peuvent-ils pas sauter et revenir sur Terre comme F. Baumgartner ?

Du point de vue technique, le scaphandre et le parachute sont au point, mais il reste une grande différence : F. Baumgartner sautait sans vitesse initiale, alors que des astronautes auraient la vitesse de leur vaisseau (de l'ordre de sept kilomètres par seconde pour une navette en orbite basse), vitesse à laquelle les forces de traînée compliqueraient considérablement l'éjection et exerceraient des contraintes très fortes sur les scaphandres. ■

universcience présente

les conférences

entrée libre

Les jeudis 17, 24, 31 janvier et 7, 14, 21 février à 19 h

théma Les uns et les autres

CYCLE "L'autre en nous"

Notre corps intègre des éléments étrangers : gènes provenant d'autres espèces, millions de bactéries en symbiose, fœtus chez la mère, organe d'un autre chez le greffé. Comment se redéfinit notre identité quand l'autre est en nous ?

avec le soutien de SCIENCE VIE

programme complet sur www.universcience.fr

SCIENCE & GASTRONOMIE

Des gelées à mâcher

Les consistances initiales des ingrédients alimentaires ne sont pas une fatalité. Avec un peu de travail, on peut les modifier et les adapter à nos goûts.

Hervé THIS



Une carotte est croquante, une viande de bœuf est fibreuse, et une gelée de groseilles est molle, aqueuse. Devons-nous accepter sans discuter la consistance des ingrédients de nos aliments, ou bien pouvons-nous travailler et obtenir des consistances adaptées à nos goûts ?

La question mérite d'être posée, à une époque où certains parent la nature de toutes les vertus et où les cuisiniers disent « respecter les produits » [alors qu'ils font des frites en mettant ces produits que sont les pommes de terre dans de l'huile à 200 °C]. Et puis, sommes-nous toujours parfaitement heureux de la qualité des ingrédients que nous nous procurons ? Non : notre pouvoir d'achat, le temps dont nous disposons, la variabilité des produits végétaux ou animaux, la saison et mille autres contingences font que nos ingrédients sont imparfaits. Nous avons cependant la possibilité de les améliorer, et c'est d'ailleurs ce qu'a toujours fait la cuisine !

En cette saison d'hiver, où les gibiers appellent des gelées de groseille ou de cassis, que faire pour viser des gelées améliorées ? Quand on centrifuge des carottes, on produit un jus frais, orange, au goût puissant, et... une « pulpe » que l'on jette, alors qu'il s'agit d'un ingrédient comestible (contenant de la cellulose, c'est-à-dire ce que les nutritionnistes nomment des « fibres alimentaires »). Conservons

cette pulpe et ajoutons-la à une gelée de groseilles ou de cassis que l'on a fait brièvement chauffer au four à micro-ondes : lors du refroidissement, nous obtenons une gelée de consistance bien différente. Certes, la transparence sera perdue, mais elle n'est pas essentielle dans le cas du cassis, où les pigments sombres ne laissent pas passer facilement la lumière. Inversement, nous pouvons régler la consistance sur mesure, afin de l'approprier à l'environnement culinaire où la « gelée modifiée » est placée.

Cette première expérience peut être généralisée : pourquoi ne pas utiliser des matières souvent considérées comme des déchets ? C'est ce qu'a fait l'industrie alimentaire avec le surimi, pâte produite à partir de petits poissons ou de déchets de poissons que l'on cuit, seule ou mêlée à de l'amidon et à du blanc d'œuf (ce qui augmente la teneur en eau) et à laquelle on donne un goût de crabe. Notons que le surimi n'est pas une nouveauté culinaire : les terrines, pains ou quenelles de poisson s'obtiennent de la même façon.

En cuisine, le même type de procédés est possible, avec du poisson ou de la viande. Normalement, les terrines sont des masses, mais il n'est guère difficile de déposer des couches minces sur des plaques de cuisson que l'on enfourne. Et si l'on veut une apparence fibreuse, il suffit de racler la couche à l'aide d'un peigne, avant la cuisson. Le

repliement en bâtonnets n'est pas obligatoire, bien sûr, et l'on pourra s'inspirer de l'exemple du surimi, qui utilise du paprika pour colorer, en généralisant à l'ensemble des colorants alimentaires.

Allons plus loin : pourquoi ne pas hybrider les règnes végétal et animal ? La cuisson d'une joue de bœuf ou de poisson dans une grande quantité d'eau produit des agrégats de protéines dont on peut retirer le goût, pour les utiliser ensuite dans des mets à base de tissus végétaux, voire les gelées évoquées en début d'article. Inversement, des fibres végétales peuvent être ajoutées à des produits carnés. Tout est possible, pour qui veut jouer avec la nourriture... afin de contenter ses convives. Oui, nous pourrions rester à Noël sur la dinde... trop souvent sèche et fibreuse quand elle n'est pas préparée à temps, mais pourquoi ne pas en changer la consistance à l'avance afin d'avoir encore mieux ? ■



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 H. This sur www.pourlascience.fr

→ EXPÉDITIONS

Tara Oceans

Eric Karsenti et Dino Di Méo

Actes Sud, 2012
(192 pages, 29 euros).

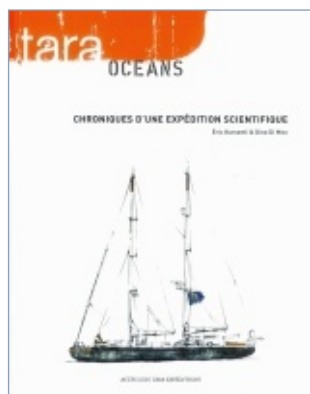
Ce carnet de bord de l'expédition scientifique *Tara Oceans* retrace le dernier périple scientifique de la goélette *Tara* qui, de 2009 à 2012, a parcouru mers et océans pour étudier les récifs coralliens et le plancton. À l'opposé de la « big science », cette aventure s'est inspirée des expéditions marines à taille humaine comme celle de Darwin à bord du *Beagle*. Son récit aborde le montage du projet, le choix des questions scientifiques traitées, ainsi que les différentes étapes du parcours.

L'échantillonnage réalisé vise à caractériser la complexité des écosystèmes planctoniques (virus, virus géants, bactéries, plancton) et à comprendre les relations étroites entre la diversité microscopique et les conditions environnementales (salinité, acidité, oxygène, température, lumière, nutriments, masses d'eau...). Parmi le million d'espèces de protistes, certaines sont-elles spécifiques aux grands tourbillons ? Comment se produit le blanchiment des coraux ? Comment la fertilisation en fer des océans par l'apport de sables désertiques agit-elle sur le phytoplancton ?

Pour répondre à ces questions, *Tara* a traversé de forts gradients d'acidité et d'oxygénation dans l'océan Indien, assisté au blanchissement massif des coraux de Mayotte, suivi les grands tourbillons du courant des Aiguilles au Sud de l'Afrique, les remontées d'eaux profondes du Benguela, puis le grand gyre sud-atlantique jusqu'en Amérique du Sud, avant de rejoindre l'océan Pacifique avec, notamment, le « continent de plastique » accumulé dans la gyre du

Pacifique Nord. Après la traversée du canal de Panama, *Tara* a fait plusieurs étapes dans le golfe du Mexique pour évaluer les effets de la pollution par les hydrocarbures, avant de boucler son périple en suivant les eaux du Gulf Stream en surface et en profondeur, et l'effet du vent sur les mouvements verticaux du plancton.

Cette expédition s'est accompagnée de prises de risques nombreuses, entre le démarrage du projet sans que son budget ne soit bouclé, les alertes aux pirates dans l'océan Indien et les tempêtes australes, qui ponctuent le récit des différentes étapes et escales. Une multitude d'informations ont été extraites de données satellitaires, de calculs océanographiques, de *gliders* (engins sous-marins) pour optimiser les prélèvements d'échantillons, à partir d'un mélange de technologies les plus pointues et d'une navigation traditionnelle à



la voile. De splendides photographies de micro-organismes marins, dessins, photographies de la vie à bord et des différents paysages font ressentir l'aventure humaine partagée par les 200 personnes ayant participé à cette expédition ainsi que leurs nombreuses rencontres. Les questions posées par les curieux de tous horizons reflètent la fascination de l'infiniment petit et les interrogations sur le devenir des océans. Ces chroniques de *Tara*

Oceans, très réussies, suscitent l'envie d'en savoir plus !

→ Valérie Masson-Delmotte

LSCE, CEA-Ormes des Merisiers

→ ARCHÉOLOGIE

Ile de Pâques Terra Incognita

Micheline Pelletier
et Sonia Haoa Cardinali

La Martinière, 2012
(191 pages, 39,90 euros).

La grande force de ce magnifique ouvrage est la qualité et la variété des photos prises par Micheline Pelletier, qui témoignent de sa connaissance de l'île de Pâques et de son amour pour cette île extraordinaire. Le texte présente le récit de sa découverte, ainsi que les informations que les archéologues et les botanistes ont pu apporter sur son histoire. Diverses théories sont résumées – certaines mieux fondées que d'autres – sur le transport des statues monolithiques et sur les raisons des déclin environnemental et culturel de l'île.

Dans l'ensemble, le texte est solide, même s'il comporte quelques erreurs (par exemple, page 18, Ouest et Est sont confondus, de même que, page 131, les pointes de lance en obsidienne – *mataa* – et les percuteurs en pierre – *toki*). L'auteur a en outre eu la sagesse de consacrer une bonne partie du livre à des entretiens avec divers spécialistes tels que Hélène Guiot sur la colonisation de la Polynésie, Mark Horrocks sur l'évolution botanique de l'île et Jo Anne Van Tilburg, la grande spécialiste des statues monolithiques de l'île.

Les entretiens les plus intéressants sont ceux avec Burkhard Vogt, chef de l'équipe allemande qui, guidée par Sonia Haoa, archéologue native de l'île, a

détecté un bassin en pierre remarquable, probablement construit à des fins rituelles. Il discute aussi des ressources en eau de l'île, un sujet crucial négligé jusque récemment.

L'ouvrage ne se concentre pas uniquement sur le passé, cepen-



dant. Il poursuit l'histoire jusqu'à aujourd'hui, évoquant les relations parfois tendues de l'île avec le Chili et le grave problème des ordures produites par le nombre sans cesse croissant d'habitants et de touristes. Si une solution n'est pas trouvée bientôt, ces déchets pollueront les ressources en eau de l'île, tandis que le tourisme, aujourd'hui la principale source de revenus, risque d'endommager les monuments qui, justement, l'attirent.

→ Paul Bahn

Archéologue britannique indépendant, spécialiste de l'île de Pâques

→ HISTOIRE DES SCIENCES

Regards sur les textes fondateurs de la science (vol. 2)

Alexandre Moatti (dir.)

Cassini, 2012
(249 pages, 10 euros).

L'ouvrage regroupe des commentaires sur des textes qui ont changé la face du monde scientifique, en optique et en radioactivité.

Nombre de questions d'optique étaient liées à la navigation, notam-

ment «l'impossible problème des longitudes», selon la lamentation de Voltaire, et le repérage des navires près des côtes. Pour ce dernier problème, la contribution de Fresnel à la confection de lentilles adaptées formées d'anneaux de convergence fut déterminante.

L'optique classique des lentilles et des miroirs n'est plus une science moderne et ne constitue plus un sujet d'études très actif. Aussi avons-nous oublié le nom de Fresnel. Le livre ranime sa gloire. Fresnel connaissait les mathématiques utiles à son art, il calculait même les intégrales non répertoriées (les intégrales de Fresnel) par des développements en série avec une précision de quelques dix-millièmes; il était un excellent théoricien qui raisonna avec justesse sur la nature ondulatoire de la lumière (principe d'Huygens-Fresnel); il fut un expérimentateur hors ligne, mesurant des distances à moins d'un quarantième de millimètre, et enfin un ingénieur confirmé. Le tout avant de mourir de tuberculose à 39 ans.

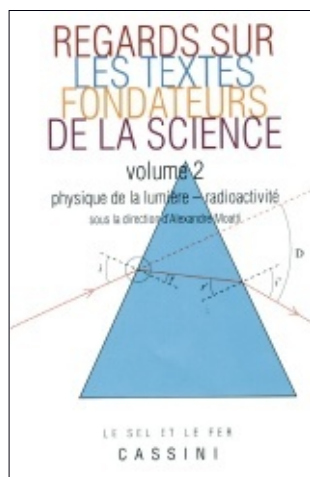
À quoi sert l'histoire des sciences? S'agit-il de «Belles histoires de l'oncle Paul» montrant des exemples édifiants d'une science surannée? C'est cela et autres choses. Dans ce livre, tous les récits sont des discours de la méthode montrant les démarches,

quelquefois chanceuses (mais le hasard sourit aux esprits préparés), vers les découvertes. Chaque scientifique a sa qualité majeure; Rutherford est un intrépide qui sait accepter, puis maîtriser la complexité des familles radioactives; Newton a la faculté d'imaginer des expériences concluantes (pensons aux deux prismes qui décomposent et recomposent la lumière), tout comme le couple Joliot-Curie qui démontre la radioactivité artificielle; Becquerel a la rigueur et la sérendipité (la découverte des effets biologiques de la radioactivité).

Le génie de Becquerel fut de développer des plaques photographiques qu'il pensait vierges. Elles ne l'étaient pas: elles étaient impressionnées par les émanations du radium tout comme celles exposées au soleil. Becquerel a su faire table rase de ses idées préconçues sur la cause des émanations qu'il pensait dues à la fluorescence induite par la lumière solaire.

Ce souci de vérifications est une marque de volonté. L'histoire des sciences nous montre que la découverte est le fait d'esprits libres qui tiennent le probable pour faux jusqu'à preuve du contraire. Enfin, les textes qui retracent les découvertes des scientifiques de l'ouvrage sont d'une limpidité qui font honneur à leur auteur et à Alexandre Moatti, directeur de la collection.

→ Philippe Boulanger



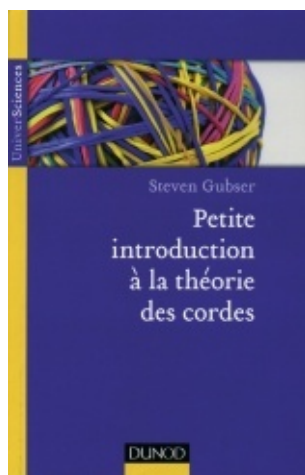
→ PHYSIQUE

Petite introduction à la théorie des cordes

Steven Gubser

La Découverte, 2012
(192 pages, 19 euros).

Qui n'a entendu parler de la théorie des cordes? Ce vaste édifice mathématique, d'une complexité extrême, constitue l'un



des grands chantiers actuels de la physique théorique. Selon ses architectes, il pourrait à terme donner les bases d'une théorie ultime en physique. Dans cet ouvrage rafraîchissant, l'auteur se concentre sur une tâche difficile: donner aux lecteurs les clefs nécessaires pour comprendre les bases et les enjeux de la théorie des cordes.

Bien entendu, on ne sera pas devenu expert du domaine une fois la dernière page atteinte! L'objectif du livre est tout autre: donner un aperçu de la façon dont la théorie des cordes s'articule avec les différents pans de la physique, de la physique des particules à la gravitation, en passant par la théorie des branes (l'extension de la théorie à des cordes de dimension supérieure que l'on nomme des membranes), les collisions d'ions lourds et les trous noirs.

Ce faisant, il réussit un tour de force: adapter son propos, tout au long de l'ouvrage, pour que tout lecteur (suffisamment concentré et attentif, tout de même!) y trouve son compte, qu'il soit lycéen, amateur de physique chevronné ou même physicien professionnel. Il aborde ainsi des notions techniques (par exemple la notion de théorie renormalisable, d'invariance de jauge ou de dualité) de façon simple, à l'aide d'analogies que

Brèves

Variations sur un même ciel

Jean-Philippe Uzan (dir.)

La Ville Brûle, 2012
(352 pages, 37 euros).



Le ciel n'est à personne, l'imagination est à tout le monde: aux morts comme aux vivants, aux philosophes comme aux savants, aux écrivains comme aux rêveurs. Les 26 auteurs morts de ce livre et les 22 auteurs vivants qui leur répondent voient ou ont vu un même ciel, mais y réagissent avec l'infinie variété née de leurs diverses spécialités et époques. Une constante, cependant: le vertige devant le ciel, puissant stimulant pour l'imagination.

Peinture & photographie

Dominique de Font-Réaulx

Flammarion, 2012
(328 pages, 60 euros).

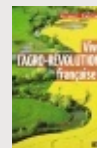


Lorsque la photographie est née au milieu du XIX^e siècle, des liens, d'abord timides, puis assumés, entre la peinture et ce nouveau mode de création picturale se sont créés. C'est l'histoire de cette rencontre que raconte le conservateur en chef du musée du Louvre dans ce magnifique ouvrage illustré. Études d'après nature, fixation d'un instant atmosphérique, de détails géologiques, d'expressions pour mieux les restituer ensuite – ou, à l'inverse, mise en photographie de thèmes chers à la peinture – sont quelques-unes de ces interactions qui firent entrer la photographie dans le monde de l'art.

Vive l'agro-révolution française!

Vincent Tardieu

Belin, 2012
(464 pages, 22 euros).



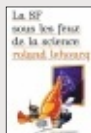
Ce n'est pas la première fois qu'un ouvrage laisse entrevoir des alternatives écologiques et rentables à l'agriculture industrielle actuelle. Toutefois, celui-ci est plus qu'un *n*-ième plaidoyer pour l'agriculture biologique. Par une enquête de terrain fournie et précise, tant auprès d'agriculteurs que de chercheurs en agronomie, l'auteur, journaliste scientifique, dresse un portrait concret du monde agricole français: ses difficultés, ses contraintes, mais aussi sa capacité d'innovation. Localement, paysans et agronomes conçoivent et testent ensemble, à leur échelle, de nouvelles pratiques plus respectueuses de l'environnement. Et montrent qu'une autre agriculture est possible...

Brèves

La SF sous les feux de la science

Roland Lehoucq

Le Pommier, 2012
(216 pages, 20 euros).



L'auteur prend un joyeux plaisir à mettre en parallèle l'imagination bien connue des auteurs de science-fiction et celle, moins connue mais non moins vive, des physiciens. Les inventions de la SF ne sont pas si loin qu'on pourrait le croire des problèmes que la physique se pose (et résout parfois !). Dans un style clair et alerte, l'auteur, aussi familier des récits de SF que des théories de la physique, organise un dialogue entre les uns et les autres.

Le bitume dans l'Antiquité

Jacques Connan

Errance, 2012
(270 pages, 35 euros).



Le bitume, un résidu de pétrole qui suinte à travers les roches, est utilisé depuis l'Antiquité comme colle, comme liant en architecture, comme mastic, pour modeler des statues ou des prothèses, pour rendre les bateaux étanches... L'auteur, géochimiste pétrolier, couvre tous les sujets rencontrés en archéologie du bitume, non seulement dans les civilisations mésopotamiennes et égyptiennes, mais aussi chez les Jomons au Japon ou chez les Chelmash de Californie... Il met ainsi sa connaissance unique du bitume à la disposition des archéologues et de tous ceux que ce matériau ancien fascinent.

La France des paysages

D. Decobecq et al.

BRGM Éditions, 2012
(208 pages, 29 euros).



La France est belle. Quand, pour le montrer, des géologues choisissent ses paysages, cela produit un choix spectaculaire ; quand en plus, ils les expliquent, cela devient fascinant ; et quand tout cela est accompagné de la culture locale liée à ces paysages, cela devient un voyage. Faites-le en errant d'abord d'image en image, de l'île de Groix, face à Lorient, à l'incroyable mont Aiguille dans le Vercors à la piste des reptiles d'Émosson dans les Alpes du Nord, etc. ; choisissez ensuite une curieuse structure géologique, lisez son étonnant passé géologique, puis son inattendue histoire culturelle...

le physicien le plus pointilleux trouvera acceptables. Fait remarquable : il s'agit bien d'analogies et non de ces images poétiques qu'on lit dans tant d'ouvrages, laissant perplexes le lecteur expert et le néophyte...

Un tel ouvrage était d'autant plus souhaitable que les essais de vulgarisation de la théorie des cordes servent souvent de prétexte à des plaidoyers partisans – écrits par ceux que ses trésors potentiels émerveillent, ou par ceux qu'elle déçoit ou qu'elle décourage par ses difficultés mathématiques... Du reste, les discussions sur cette théorie tourment souvent au vinaigre et les querelles parfois violentes qui s'ensuivent entre les chercheurs concernés n'invitent pas à essayer d'en savoir plus.

Dans pareille ambiance, on appréciera d'autant plus la démarche modeste d'un auteur qui sait aussi ne pas tout expliquer quand il énonce des résultats dont la justification dépasserait l'entendement du lecteur. Il parvient alors à l'inciter à poursuivre sa lecture, et on lui emboîte le pas avec un grand plaisir.

→ **Richard Taillet**
Université de Savoie

→ AGRICULTURE

Le tout bio est-il possible ?

Bernard Le Buanec (dir.)

Quæ, 2012
(240 pages, 23 euros).

Il y a des livres drôles, charmants, tristes, gais... Celui-ci est à la fois intelligent et utile. Le bio ? Il en est beaucoup question, mais les idées que l'on s'en fait à la lecture de la presse sont souvent douteuses. Ici, le groupe d'auteurs, presque tous membres de l'Académie d'agriculture, sait

ce dont il parle, et le coordinateur a parfaitement orchestré les contributions. La forme de la collection (« 90 clés pour comprendre ») est adaptée au traitement de cette question difficile.

Nous sommes tous témoins que les protagonistes de « l'affaire bio » sont mal informés. Souvent l'agriculture biologique (AB) est confondue avec l'agriculture « biodynamique », création intellectuelle du philosophe autrichien Rudolf Steiner, enseignant qui s'est fait connaître en créant un courant de pensée ésotérique ; selon lui, les phénomènes physiques ne sont que l'aspect extérieur de la réalité et il existe des relations biologiques, psychiques et spirituelles entre les divers règnes de la nature. Pis, la biodynamie croit dans l'influence de la périphérie cosmique sur la vie végétale...

Tel est le type de réponses informées que l'on trouve aux questions qui structurent l'ouvrage. Rien que des « questions qui fâchent » : la production bio est-elle plus exigeante en main-d'œuvre (ce qui justifierait son coût supérieur) ? Comment assurer la fertilisation azotée en polyculture AB ? Comment contrôler les adventices en AB ? Accroître les surfaces en AB augmenterait-il les risques sanitaires ? La transgénèse aurait-elle un intérêt en AB ? Comment produire de la viande bovine bio ? L'AB protège-t-elle la diversité de la faune, de la flore et des paysages ? Les auteurs de ce livre ont merveilleusement plongé au cœur d'un sujet controversé, et su faire un livre qui pourra être lu tant par les partisans du bio que par ses détracteurs.

Un seul reproche : avoir utilisé l'expression « produit chimique »,



qui n'a aucun sens. Si la chimie est une science (et elle l'est), un produit n'est pas « chimique » : de synthèse ou non, il est toujours artificiel, dans la mesure où, extrait ou synthétisé, il a toujours fait l'objet d'un travail humain. Il est temps de trouver un nom différent de « chimie » pour les industries phytosanitaires ou des minerais, lesquelles ne sont pas de la science, mais de l'industrie. Cette réforme aiderait nos concitoyens à comprendre que le soufre natif des volcans n'est pas un bon choix pour soufre les tonneaux de vin (l'arsenic qui l'accompagne engendre le dangereux oxyde d'arsenic) ou que le purin d'orties, utilisé en AB, contient des pyrèthrénoïdes, qui sont de la même famille que nombre d'insecticides de synthèse. Au fond, de même que l'illettrisme est un fléau, l'ilchimisme, ignorance des résultats de la science chimique, nuit gravement au fonctionnement sociétal, parce qu'il permet à des marchands de peur de faire passer une idéologie rétrograde sous le couvert de discours insensés.

Faisons largement lire cet utile petit livre !

→ **Hervé This**

Retrouvez l'intégralité de votre magazine et plus d'informations sur www.pourlascience.fr

