

■ POUR LA SCIENCE

Janvier 2014 - n° 435

Édition française de Scientific American

Angkor

Une mégalopole autour des temples

L'étrangeté
quantique,
une illusion ?

Le loup en Europe :
un retour à gérer

Les planètes
à deux soleils

M 02687 - 435 - F: 6,20 € - RD



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

L'EXCELLENCE EN SCIENCES



TRAITEMENTS BIOLOGIQUES EN PSYCHIATRIE

Pierre Schulz

Novembre 2013 • 800 pages • 62 €

■ Cet ouvrage propose une synthèse des connaissances contemporaines sur les traitements biologiques en psychiatrie, avec une sélection d'informations en neurosciences cliniques et des recommandations pour la pratique médicale.



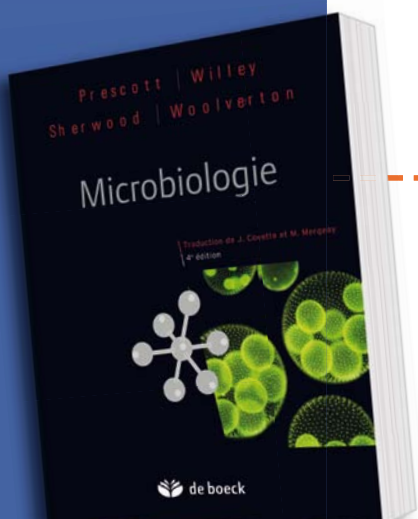
BIOSTATISTIQUE

Harvey J. Motulsky

Traduction : Michèle Dramaix-Wilmet

Septembre 2013 • 512 pages • 49 €

■ Un texte clair, accessible à tous, qui explique de manière facilement compréhensible les méthodes statistiques et détaille l'interprétation des résultats issus des analyses.



MICROBIOLOGIE

Joanne M. Willey, Linda M. Sherwood, Christopher J. Woolverton

Traduction Jacques Coyette, Max Mergeay

Octobre 2013 • 1200 pages • 120 €

■ Microbiologie est la traduction de la 8^e édition du Prescott's Microbiology, l'ouvrage américain de référence sur la microbiologie, décrite dans ses aspects fondamentaux, médicaux, écologiques, alimentaires et industriels.



CHIMIE ORGANIQUE

Jonathan Clayden, Nick Greeves, Stuart Warren

Traduction André Pousse

Août 2013 • 1280 pages • 120 €

■ Un manuel de chimie organique rigoureux et captivant, qui permet à l'étudiant de comprendre comment on passe des principes fondamentaux aux synthèses les plus innovantes.



QUANTIQUE, FONDEMENTS ET APPLICATIONS

Avec 250 exercices et problèmes résolus

José-Philippe Perez, Robert Carles, Olivier Pujol

Septembre 2013 • 1120 pages • 54 €

■ Cet ouvrage met l'accent sur les fondements scientifiques et sur les applications concrètes et quantitatives de la physique quantique, en 20 leçons structurées, illustrées par de nombreux exemples et prolongées par 250 exercices et problèmes résolus.

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

Dossier 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 : Sylvie Sobelman,
Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy, Caroline Vanhoove

Site Internet : Philippe Ribeau-Gésippe

Marketing : Élise Abib et Ophélie Maillet assistées de Anais Grelet

Direction du personnel et direction financière : 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 : Tom Chandler,
Silvana Condemni, Isabelle Czernichowski, Didier Demolin,
Gérard Eberl, François Fressin, Sophie Gallé-Soas, Berrie Giebels,
Sylvain Guiriec, Eitan Haddok, Julien d'Huy, Franck Laloë,
Frédéric Lecornue, Stéphane Létrillard, Julie Lions,
Christophe Pichon, Daniel Tacquenot, Pascale Thiollier-Dumartin

PUBLICITÉ France

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

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

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

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

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.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Editors :
Fred Guterl, Ricky Rusting, Philip Yam, Mark Fischetti, Christine Gorman,
Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong. President : Steven
Inchcoombe. Executive Vice President : Michael Florek. 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].



Observations perturbantes

Les archéologues maîtrisent l'art de faire parler les objets abandonnés par ceux qui les ont façonnés ou utilisés dans un passé lointain. Récolte patiente et méticuleuse des témoins de l'histoire, tentatives de reconstitution, modélisations et confrontation des hypothèses avec les textes – quand ils existent. Et tout cela, sans se laisser enfermer dans des scénarios existants, mais peut-être incorrects. Ainsi, Angkor ne fut pas seulement une juxtaposition de temples. Les archéologues montrent qu'une « mégapole » s'était construite autour de ces temples il y a environ 1 000 ans, s'étendant sur plus de 1 000 kilomètres carrés (voir *Angkor, genèse d'une mégapole*, page 22). Rappelons que Paris et la petite couronne (Hauts-de-Seine, Val-de-Marne et Seine-Saint-Denis) couvrent quelque 760 kilomètres carrés, Paris seul un peu plus de 100 kilomètres carrés !

« Le vrai mystère du monde est le visible, et non l'invisible. »

Retrouver ce qui a disparu, c'est aussi l'enjeu de la police scientifique. Ainsi, les détectives du numérique cherchent à faire parler les données stockées dans les dispositifs tels qu'ordinateurs, smartphones, ou encore mémoires informatiques, même si elles ont été effacées pour dissimuler des preuves ou des messages compromettants (voir *Les traces numériques du crime*, page 50).

Mais quand l'archéologue prélève un vestige pour l'analyser, quand l'informaticien restaure une mémoire effacée, ils perturbent le système. La difficulté est encore renforcée en physique quantique, puisque l'observation elle-même est destructrice. C'est l'exemple bien connu du chat de Schrödinger qui, caché à nos yeux, est à la fois mort et vivant, mais qui bascule vers l'un des deux états dès qu'on l'observe. Cherchant à lever la difficulté que pose l'approche « classique » de la physique quantique, des physiciens proposent que l'observateur évalue la probabilité que le chat soit mort ou vivant, et que la fonction d'onde du système décrive seulement ses « croyances » sur l'état du système, et non plus l'état lui-même (voir *L'étrangeté quantique, juste une impression ?*, page 30).

D'après Oscar Wilde, « Le vrai mystère du monde est le visible, et non l'invisible. » (*Le Portrait de Dorian Gray*, 1890). Mais dans le cas du chat de Schrödinger, l'invisible reste – malgré tout –, bien mystérieux !

1
4

ÉDITO

BLOC-NOTES

Didier Nordon

Actualités

6

**La phylogénie
du Petit Chaperon rouge**

7

**Pourquoi les nouveau-nés
résistent moins bien
aux infections**

9

Un génome de 400 000 ans

10

**Record de stabilité
pour des bits quantiques**

... et bien d'autres sujets.

Opinions

16

POINT DE VUE

**La Paillasse,
utopie ou innovation ?**

Adrien Clavairolly et Thomas Landrain

17

DÉVELOPPEMENT DURABLE

**Huile de palme :
vers une filière durable ?**

Alain Rival et Patrice Levang

21

VRAI OU FAUX

**Deux individus
d'espèces différentes
sont-ils interféconds ?**

Hervé Le Guyader



Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science* proches sur la totalité du tirage.
En couverture : © panyajampatong/shutterstock.com

À LA UNE

22

ARCHÉOLOGIE

**Angkor, genèse
d'une mégalopole**

Ch. Pottier, P. Bâty, J.-B. Chevance et J. Estève

Connue pour ses temples et statues au cœur de la forêt cambodgienne, Angkor se révèle avoir été un vaste complexe urbain mêlant pratiques religieuses, agriculture, réseaux hydrauliques et échanges commerciaux.

30

PHYSIQUE THÉORIQUE

**L'étrangeté quantique,
juste une impression ?**

Hans Christian von Baeyer

Certains physiciens cherchent à réinterpréter la théorie quantique en considérant les probabilités comme une notion subjective. Selon ce « bayésianisme quantique », ou « QBisme », l'étrangeté du monde microscopique ne serait alors qu'apparente.

36

ASTROPHYSIQUE

Des mondes à deux soleils

William Welsh et Laurance Doyle

Les astronomes ont découvert, grâce au télescope spatial *Kepler*, que des systèmes d'étoiles binaires abritent des planètes.



44

TECHNOLOGIE

**Enterrer le carbone
en déterrart du méthane ?**

Steven Bryant

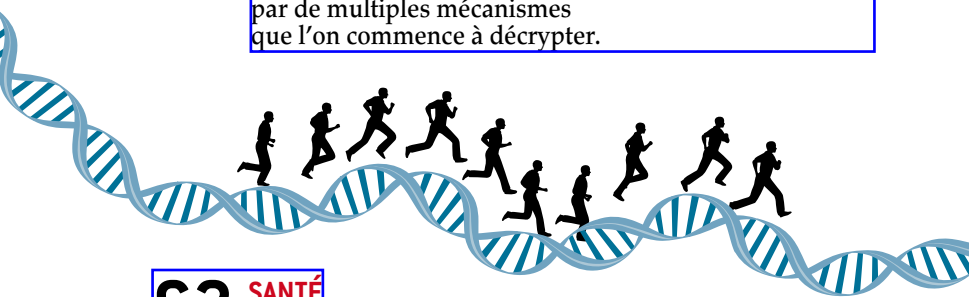
Du dioxyde de carbone pourrait être massivement stocké dans certains aquifères salins profonds, notamment dans le golfe du Mexique. L'exploitation du méthane contenu dans ces saumures et de leur chaleur assurerait la rentabilité de cette méthode.

50 INFORMATIQUE**Les traces numériques du crime***Simson Garfinkel*

Les activités criminelles laissent souvent des traces dans les ordinateurs, téléphones et autres appareils électroniques. Le recueil et l'analyse de ces indices sont devenus une part essentielle des enquêtes judiciaires.

**56 SANTÉ****Les bienfaits du sport sur la santé***Shari Bassuk, Timothy Church et JoAnn Manson*

Une activité physique régulière réduit le risque de développer diverses maladies par de multiples mécanismes que l'on commence à décrypter.

**62 SANTÉ****Du sport pour lutter contre les gènes à risque***David Meyre*

La pratique d'un sport a un impact positif bien établi sur la santé. De récentes recherches en génomique permettent maintenant de comprendre comment l'activité physique reprogramme le génome et pourquoi le sport bénéficie plus à certaines personnes.

64 BIOGÉOGRAPHIE**Le retour du loup en Europe occidentale***Farid Benhammou*

Éliminé au XX^e siècle de l'Europe de l'Ouest, le loup revient aujourd'hui, et avec lui l'hostilité des éleveurs et des chasseurs. Un conflit qu'il importe de bien gérer afin d'assurer à cette espèce une place dans la nature.

Regards**72****HISTOIRE DES SCIENCES****Pline l'Ancien et la science des Lumières***Stéphane Schmitt*

Alors qu'elle tombait dans l'oubli avec l'avènement des sciences modernes, l'œuvre naturaliste de Pline a connu un regain de succès inattendu au XVIII^e siècle.

78**LOGIQUE & CALCUL****Le dilemme du prisonnier et l'illusion de l'extorsion***Jean-Paul Delahaye*

Dans sa version itérée, le dilemme du prisonnier est un jeu qui aide à comprendre diverses situations sociales et stratégiques.

84**SCIENCE & FICTION****Monstres tentaculaires***J. Sébastien Steyer et Roland Lehoucq***86****ART & SCIENCE****Cache-cache dans un tableau***Loïc Mangin***88****IDÉES DE PHYSIQUE****Grand ménage spatial à l'électricité***Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik***93****SCIENCE & GASTRONOMIE****Des goûts qui changent***Hervé This***94****À LIRE****NOUVEAU!****POUR LA SCIENCE .fr**

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

toutes les archives

■ Pour la Science

■ Dossier
Pour la Science

depuis 1996



maintenant disponibles sur www.pourlascience.fr
* à lire en ligne ou à télécharger au format PDF

→ **TRADUTTORE, TRADITORE**

Traduire le français « Vous Ici, Belle Voisine ! Jolie Ovation Radieuse » par l'anglais « Richard Of York Gained Battles In Vain », c'est faire un contresens légitime. En effet, seul importe l'ordre des initiales, ces phrases ayant été conçues pour aider à retenir les couleurs de l'arc-en-ciel. Les Français le voient dans un sens (violet, indigo, bleu, vert, jaune, orange, rouge), les Anglais dans le sens contraire (red, orange, yellow, green, blue, indigo, violet).

En matière d'élucubration mnémotechnique, voici mieux : « Chat sonde en premier ». Chercher quelque message livré par les initiales serait vain, puisque cette phrase est traduite du chinois. Malgré son allure de message crypté, conçu pour résister aux meilleurs déchiffreurs, elle a été comprise par des millions de gens, vers 1970-1980, lorsque Deng Xiaoping dirigeait la Chine. Elle servait d'aide-mémoire pour retenir trois autres formules, qui résumaient la ligne pragmatique, empirique et économiste de Deng Xiaoping. « Peu importe la couleur du chat, s'il attrape les rats c'est un bon chat ! », « Sonder chaque pierre avant de franchir la rivière à gué », « Laissons une partie de la population s'enrichir en premier » [Liu Xinwu, *Je suis né un quatre juin*, Gallimard, 2013].

Un Français sommé de deviner à l'improviste le sens de « Chat sonde en premier » ne pourrait que « donner sa langue au chat » : quant aux formules saugrenues, les Français ne sont pas en reste sur les Chinois !

→ **LE LEVAIN DU PHILOSOPHE**

La science tente des explications et des prévisions, donc est discutable, alors que le bon sens énonce des évidences, donc est indiscutable.

Exemple : à la boulangerie. Souvent, le pain s'accompagne de propos de bon sens (« Quelle chaleur, aujourd'hui ! ») qui, épuisant le sujet, limitent l'éventail des réponses possibles. Mais on peut aussi entendre – et ce, dès le lundi ou le mardi : « Profitons du beau temps, ils annoncent des orages ce week-end ». Ces propos-là offrent un splendide champ de réponses. En effet, ils ne relèvent pas du sens commun et de l'observation immédiate, mais de la prévision scientifique. Ils imposent donc une discussion fouillée – à laquelle, loin de s'impliquer, participent tous ceux qui font la queue. Quel modèle les météorologues ont-ils choisi ? Est-il adapté à la situation locale ? Leur simulation informatique est-elle fiable ? Ont-ils bien validé leurs méthodes ? Leurs données numériques sont-elles précises ? Cet échange impose de repenser la procédure suivie par les météorologues. Passionnant !

Parler du temps qu'il fait mène aux platitudes. Discuter le temps qu'il fera est une stimulation intellectuelle. L'achat du pain devient une fête pour l'esprit.

→ **LA FIN DE L'HONNÊTE HOMME**

Sans doute les travaux de Fermat étaient-ils trop difficiles pour qu'un honnête homme contemporain de Fermat les lise. Mais, les mathématiques mises à part, on peut se figurer l'honnête homme comme celui à qui aucun texte de son époque n'était *a priori* interdit à cause de sa trop grande technicité.

S'il n'y a plus d'honnête homme aujourd'hui, ce n'est pas seulement à cause de l'accroissement de la quantité de savoir. C'est aussi parce que sa technicité fait de chacun de nous un analphabète, incapable

de lire nombre d'écrits qui lui passent sous les yeux. Nous ne voyons pas trop par quel bout prendre une formule chimique un peu savante. Les mathématiques et la physique ne sont déchiffrables que par des mathématiciens et des physiciens.

Du coup, cet art typique de l'honnête homme qu'est la conversation est passé de mode. Les gens ne manifestent guère la curiosité pour les activités des autres nécessaire à la conversation. C'est qu'ils ont tiré la leçon du fait que nous vivons dans un monde où chacun se veut spécialiste. À quoi bon poser des questions, si on s'attend à ne pas comprendre les réponses ?

→ **ÉVOLUER POUR DURER**

Membre de l'Académie française dès sa création, Nicolas Faret (vers 1596-1646) a contribué à en définir les statuts. Nul ne contestera donc qu'il fut un grand écrivain !

Mais, pour que Nicolas Faret soit un grand écrivain, il faudrait qu'il ait un minimum de présence aujourd'hui. Laquelle ne peut être due qu'au travail d'hommes actuels. Il ne suffit pas qu'ils aient numérisé ses ouvrages originaux, accessibles sur *Gallica*. Les lire reste en effet réservé aux spécialistes. Faret ne reprendrait vie qu'au prix d'une intervention invasive sur son œuvre : l'éditer en français moderne, selon la typographie actuelle,



avec des notes sur les mots dont le sens a changé, et un appareil critique expliquant le contexte de l'œuvre, ses conséquences, sa portée pour nous aujourd'hui. Tout cela reviendrait à la modifier.

Les scientifiques, dit-on, n'ont pas le même rapport avec leurs classiques que les littéraires. Ils utilisent les résultats sans se reporter aux œuvres originales. En fait, l'opposition n'est pas si nette. On lit plus souvent les classiques de la littérature en édition modernisée qu'en *fac simile* d'une édition d'époque. On ne lit donc pas un original, mais un original retravaillé. Littéraire ou scientifique, un classique reste vivant si, et seulement si, la postérité a le souci de l'actualiser, donc de le transformer.

→ LE CHOIX DES MAUX

La théorie des humeurs apportait sûrement une satisfaction intellectuelle à ceux qui la soutenaient. Elle fournissait une explication aux différences de caractères entre individus, elle trouvait une cause à la survenue des maladies.

Les statistiques n'apportent pas cette satisfaction. Les corrélations qu'elles établissent ne sont ni des causes ni des explications. Seulement, les statistiques aident la médecine à être efficace. En général, mieux vaut recourir à un remède dont elles montrent qu'il agit – même si nul ne comprend comment – plutôt qu'à un remède dont quelque théorie assure qu'il devrait agir.

La satisfaction intellectuelle d'avoir une théorie explicative et la satisfaction physique d'être guéri ne vont pas toujours de pair. ■



Toutes les ARCHIVES

- Pour la Science
- Dossier Pour la Science

depuis

1996



maintenant disponibles sur www.pourlascience.fr

* à lire en ligne ou à télécharger au format PDF

Linguistique

La phylogénie du Petit Chaperon rouge

De nombreux contes partagent des points communs. Une analyse inspirée des techniques phylogénétiques utilisées en biologie permet de retracer leurs relations et leur évolution.



Domaine public (Gustave Doré, 1865)

Dans le conte du Petit Chaperon rouge, une petite fille traverse une forêt pour apporter des gâteaux à sa grand-mère. Dans la version de Charles Perrault (1698), elle est dévorée par le loup qui se fait passer pour la vieille dame; dans celle des frères Grimm, datant du début du XIX^e siècle, le Petit Chaperon rouge et sa grand-mère sont sauvés par un chasseur. Il existe de nombreuses variantes de cette histoire, en particulier dans la tradition orale. Les similitudes entre ces récits sont utilisées pour les classer et établir des filiations entre les contes. Mais cette approche fait l'objet de débats. Jamshid Tehrani, de l'Université de Durham, au Royaume-Uni, a utilisé une méthode s'inspirant de l'analyse phylogénétique – qui vise à construire des arbres de parenté à partir de traits partagés – pour reconstituer l'arbre de parenté du Petit Chaperon rouge et de ses variantes.

Au XIX^e siècle, les frères Grimm avaient remarqué que les contes allemands qu'ils avaient recueillis existaient dans d'autres cultures sous diverses formes. Le Finlandais Antti Aarne et l'Américain Stith Thompson ont eu l'idée de regrouper dans des catégories les contes qui partagent certaines caractéristiques, ou mythèmes.

Mais cette méthode est critiquée. Les contes européens étant les plus étudiés, ils introduisent un biais sur le choix des mythèmes servant à établir les catégories. Il est parfois difficile d'intégrer dans ces catégories les contes africains ou asiatiques. En outre, certains contes partagent des caractéristiques appartenant à plusieurs catégories proches. C'est le cas des catégories ATU 333 du Petit Chaperon rouge et

ATU 123 du Loup et des sept chevreux (dans ce conte, une chèvre laisse ses chevreux à la maison et le loup profite de son absence pour s'y introduire et dévorer les petits).

Or depuis les années 1960, pour classer les différentes espèces, les biologistes s'appuient sur l'analyse phylogénétique. C'est cette approche qu'a exploitée J. Tehrani: elle s'applique bien au cas des contes, qui évoluent lors de leur diffusion orale. Il a utilisé trois méthodes d'analyse phylogénétique pour comparer 58 variantes de contes classés dans les catégories ATU 333 et ATU 123.

Les trois approches donnent des résultats très similaires. Il se dégage deux ensembles, ou clades, qui correspondent globalement à ATU 333 et ATU 123. Cela s'accorde, en partie, avec résultats de la méthode de classification classique. Les récits africains, à l'exception d'un seul, Ibo, se retrouvent dans la catégorie ATU 123, ce qui suggère que le conte Ibo pourrait ne pas être local, mais adapté d'un conte européen importé.

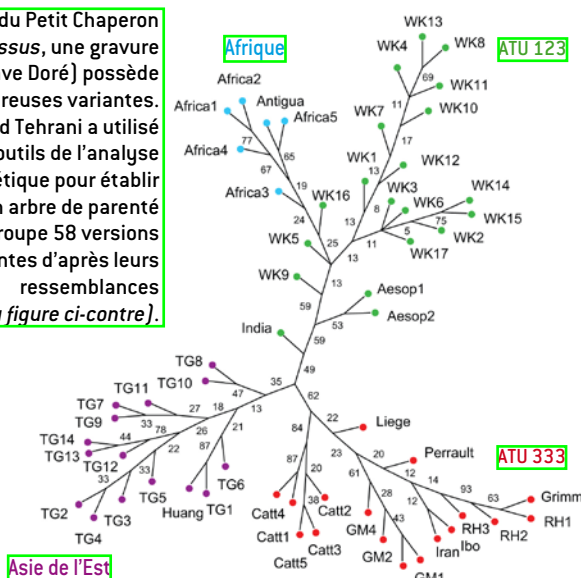
Les contes asiatiques se démarquent des deux clades et forment un ensemble cohérent qui découle probablement d'un mélange des deux autres clades.

Avec seulement 58 variantes de contes, J. Tehrani n'a étudié qu'une petite partie du corpus connu des récits proches du Petit Chaperon rouge. Il montre néanmoins que l'approche phylogénétique est efficace et qu'elle permet de mettre en évidence des relations qui échappent à l'approche classique.

→ Sean Baillly

J. Tehrani, PLoS ONE, vol. 8(11), e78871, 2013

Le conte du Petit Chaperon rouge (ci-dessus, une gravure de Gustave Doré) possède de nombreuses variantes. Jamshid Tehrani a utilisé des outils de l'analyse phylogénétique pour établir un arbre de parenté qui regroupe 58 versions des contes d'après leurs ressemblances (voir la figure ci-contre).



Biophysique

La danse du ventre du poisson électrique

Certains poissons électriques ont une maîtrise exceptionnelle de leurs déplacements. Ils peuvent se maintenir en nage stationnaire dans un courant et avancer ou reculer brusquement. En examinant de plus près ces animaux, on découvre qu'ils font des mouvements qui ne semblent pas

participer directement au déplacement. À quoi servent ces gestes en apparence inutiles? Noah Cowan, de l'Université Johns Hopkins, à Baltimore, aux États-Unis, et ses collègues, ont montré chez *Eigenmannia virescens* que la double ondulation de la nageoire anale (située sous le ventre) confère à

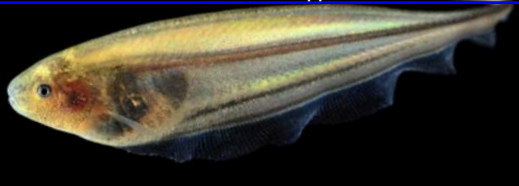
ce poisson à la fois stabilité et manœuvrabilité.

La partie antérieure de la nageoire ondule dans un sens, tandis que la partie postérieure ondule dans l'autre. Cela engendre deux forces antagonistes, l'une orientée vers l'avant et l'autre vers l'arrière. Les chercheurs ont modélisé le double mouvement d'ondulation. Ils ont montré que celui-ci crée une force d'amortissement qui augmente la stabilité du poisson. Et en ajustant ces ondulations, le poisson peut avancer ou reculer très vite.

→ S. B.

S. Sefati et al., PNAS, en ligne le 4 novembre 2013

La nageoire du poisson *Eigenmannia virescens* située sous son ventre ondule dans deux sens opposés.



Immunologie

Pourquoi les nouveau-nés résistent moins bien aux infections

Pourquoi les nouveau-nés sont-ils si sensibles aux infections? On pensait que cela était dû à l'immaturité de leur système immunitaire, mais ce n'est pas la seule raison, selon Shokrollah Elahi, du Centre médical hospitalier pour enfants de Cincinnati, aux États-Unis, et ses collègues. Ces chercheurs ont montré, chez la souris, qu'une population de globules rouges produite en abondance à la naissance supprimerait la réponse immunitaire, ce qui permettrait à la flore intestinale de se constituer.

Les biologistes ont montré que l'absence de réponse immunitaire du nouveau-né est induite par un mécanisme qui lui est propre: injectées à des souriceaux nouveau-nés, des cellules immunitaires adultes ne réagissent plus en présence d'une bactérie pathogène. En revanche, en bloquant l'activité



d'une enzyme, l'arginase, dans une culture de cellules immunitaires adultes et néonatales, les biologistes restaurent la réponse immunitaire des cellules adultes. L'arginase agirait ainsi comme un suppresseur d'immunité.

Or à la naissance, le sang du souriceau est enrichi en une population de globules rouges notés CD71⁺ qui produisent cette

enzyme. Ainsi, contrairement à la souris adulte, le souriceau nouveau-né produirait de l'arginase en abondance, qui réprimerait la réponse immunitaire. Cette population de cellules jouerait un rôle important dans la constitution de la flore intestinale, les bactéries qui peuplent l'intestin. En leur absence, l'intestin des souriceaux nouveau-nés s'enflamme au contact de bactéries de la flore intestinale, ce qui empêche leur installation. En inhibant la réponse immunitaire à la naissance, les cellules CD71⁺ laisseraient les bactéries coloniser l'intestin et constituer sa flore.

Cette découverte pourrait aider à mieux comprendre les besoins des enfants prématurés ou à adapter les stratégies thérapeutiques de défense des nouveau-nés contre les infections.

→ Marie-Neige Cordonnier

Nature, en ligne le 6 novembre 2013

En bref

La peur héréditaire

Des souris conditionnées pour redouter une certaine odeur peuvent transmettre cette peur à leur descendance, selon une étude de l'Université Emory, aux États-Unis. En effet, quand une femelle est inséminée avec le sperme d'un mâle conditionné, sa progéniture développe aussi cette peur. Le conditionnement provoquerait, jusque dans les gamètes, un changement de la méthylation des gènes (une marque chimique influençant l'expression des gènes) responsables de la sensibilité à l'odeur apprise.

Piloter avec la langue

Jeonghee Kim et ses collègues, aux États-Unis, ont mis au point un système sans fil permettant de diriger un fauteuil roulant avec la langue: il suffit de la bouger dans la direction désirée. Un petit aimant est fixé à la langue par un piercing; ses mouvements sont repérés par quatre capteurs magnétiques placés sur un casque, puis traduits en commandes motrices. Un tel dispositif, aussi capable de guider un curseur sur un écran, servirait notamment aux personnes tétraplégiques dont la voix est trop faible pour les systèmes de reconnaissance vocale.

A l'abri dans les agrumes

La drosophile fait la fine bouche pour pondre ses œufs. Marcus Stensmyr, de l'Institut Max Planck d'écologie chimique à Jena, en Allemagne, et son équipe ont montré que les mouches du vinaigre pondent surtout dans les agrumes mûrs. Les insectes repèrent ces fruits avec un seul type de récepteur olfactif, Or19a. Un avantage de ce choix est que l'odeur particulière des agrumes (due en particulier au limonène) repousse les guêpes qui parasitent les larves de drosophiles.

En bref

Un lac où il fait bon vivre ?

Le rover *Curiosity* continue d'explorer et d'analyser le sol martien. Selon plusieurs travaux publiés le 9 décembre par l'hebdomadaire *Science*, Yellow knife Bay, dans le cratère Gale, aurait contenu un lac d'eau douce à pH neutre et contenant les éléments nécessaires à la vie tels que le carbone, l'oxygène, le soufre, l'azote et le phosphore. Plus important, les chercheurs ont montré que ce lac aurait perduré des dizaines, voire des centaines de milliers d'années. Mais de la vie... aucune trace.

Du boson de Higgs au tau

En juillet 2012, les physiciens des expériences ATLAS et CMS, au collisionneur LHC du CERN, ont annoncé la découverte d'une particule censée être le boson de Higgs. Depuis, ils étudient ses propriétés, en particulier ses désintégrations en paires de particules. Ils l'ont observé produire d'autres types de bosons (Z, W et photons). Or s'il s'agit du fameux boson de Higgs, la particule doit aussi pouvoir se désintégrer en une autre famille de particules, les fermions. C'est désormais vérifié : la désintégration en paires de taus, sortes d'électrons très massifs, a été constatée.

Mathématiques

Nombres premiers jumeaux : l'étau se resserre

Le 13 mai 2013, le mathématicien Yitang Zhang, de l'Université du New Hampshire, aux États-Unis, montrait qu'il existe une infinité de paires de nombres premiers dont la différence était d'au plus 70 000 000. C'était une première étape importante vers la démonstration de la conjecture des nombres premiers jumeaux, qui affirme l'existence d'une infinité de couples de nombres premiers ne différant que de 2 (tel le couple (11, 13)).

Ce résultat a déclenché un regain d'intérêt pour cette conjecture. Le mathématicien australien Terence Tao, lauréat d'une médaille Fields en 2006, a ainsi mis en place un projet collaboratif inédit entre des mathématiciens. Ce projet a débouché sur une réduction considérable de la borne établie par Y. Zhang. Indé-

pendamment, James Maynard, de l'Université de Montréal, a développé une approche différente encore plus efficace.

Dès la fin du mois de mai, le paramètre de Y. Zhang a été ramené à 60 000 000 par de simples ajustements sur la première démonstration. Le 4 juin, T. Tao a créé, dans le cadre du projet « Polymath », une collaboration ouverte et en ligne qui a attiré des dizaines de mathématiciens. Ils ont pu, en fonction de leurs compétences, s'attaquer aux trois parties distinctes de la démonstration de Y. Zhang pour l'améliorer. Le 27 juin, le paramètre avait été réduit progressivement à 4 680. Le projet collaboratif était déjà un succès.

Une nouvelle publication par J. Maynard est venue donner un coup d'accélérateur au projet de T. Tao. Dans cet article, le mathé-

maticien de Montréal a trouvé un moyen d'améliorer la méthode de Y. Zhang en remplaçant un outil qui estime la probabilité qu'un nombre soit premier. Il a repris et corrigé une technique développée en 2003 par Daniel Goldston, de l'Université d'État de San José, et Cem Yildirim, de l'Université Bogaziçi d'Istanbul. Il atteint ainsi une valeur de 600 pour la borne !

Aujourd'hui, J. Maynard et le projet Polymath comptent unir leurs forces pour réduire encore l'écart. Cependant, la conjecture des nombres premiers jumeaux (borne égale à 2) ne sera probablement pas atteinte par cette approche. En effet, la valeur qu'il serait théoriquement possible d'atteindre dans la méthode de J. Maynard est 12.

→ S. B.

J. Maynard, prépublication, <http://arxiv.org/abs/1311.4600>

Anthropologie sociale

Taille d'un groupe et complexité culturelle

Maxime Derex et trois collègues, de l'Institut des sciences évolutives de l'Université de Montpellier, viennent de réaliser une expérience qui conforte l'idée que la taille d'un groupe humain influe sur sa capacité à transmettre et améliorer des traits culturels.

Dans cette expérience réalisée à l'aide d'un jeu vidéo, les chercheurs ont réparti 366 joueurs en groupes de 2, 4, 8 ou 16 individus. Puis ils les ont dotés d'un « bagage culturel » en leur faisant regarder des vidéos montrant la réalisation d'un outil simple – une pointe de flèche – et celle d'un outil complexe – un filet de pêche. Les participants ont dû ensuite

reproduire, en temps limité, soit l'un, soit l'autre de ces outils. En effectuant ces tâches, ils dégradaient, par rapport au modèle présenté dans la vidéo, la qualité de l'objet virtuellement fabriqué, ou au contraire l'amélioraient en innovant.

Dans tous les cas, les participants à l'expérience étaient récompensés par de l'argent. Par ailleurs, le rôle de la répétition des tâches était simulé par une succession de 15 essais, entre lesquels chaque participant pouvait voir les gains obtenus par les autres membres de son groupe et, en cliquant sur leurs scores, observer chacune des étapes par lesquelles ils avaient réalisé leurs outils.

Cette expérience a conduit à trois constatations : les tâches simples sont mieux transmises que les complexes ; les chances de conserver les savoir-faire d'une tâche complexe augmentent avec la taille du groupe ; les meilleures performances dans la réalisation des tâches s'observent au sein des groupes les plus grands. Elles corroborent les idées de l'anthropologue Joseph Henrich, de l'Université de Colombie-Britannique au Canada, pour qui l'évolution culturelle s'opère à la faveur d'une « sélection culturelle » à l'œuvre pendant la reproduction des tâches au sein d'un groupe.

→ François Savatier

M. Derex et al., *Nature*, vol. 503, pp. 389-393, 2013



Les réalisations d'une pointe de flèche et d'un filet de pêche ont été représentées, dans l'expérience effectuée, par des dessins tracés à l'écran.

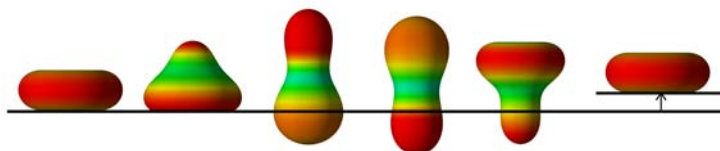
Biophysique

Nager en se déformant

Certains organismes unicellulaires tels que les amibes se déplacent dans un milieu liquide en se déformant. Le mécanisme hydrodynamique de cette nage et son efficacité ne sont pas encore bien compris, mais une équipe de chercheurs de Grenoble et d'Oslo vient d'élaborer un modèle simple qui reproduit un tel mode de propulsion. Chaouqi Misbah, du Laboratoire de physique interdisciplinaire (CNRS et Université Joseph Fourier), et ses collègues ont notamment fait l'hypothèse que la membrane cellulaire du micronageur garde une aire constante et que la déformation cellulaire conserve, à tout instant, une symétrie de révolution autour de l'axe du déplacement. Les calculs analytiques et numériques fondés sur ce modèle montrent que la distance de déplacement de la cellule au bout d'une étape de déformation dépend des formes initiale et finale du micronageur, mais pas de la vitesse à laquelle s'est effectuée la déformation.

→ Maurice Mashaa

A. Farutin et al., Phys. Rev. Lett., vol. 111, 228102, 2013



Un exemple de déformation cellulaire à symétrie axiale, qui a pour résultat de déplacer la cellule le long de l'axe de symétrie. Les couleurs codent la force exercée par la membrane sur le fluide ambiant (en rouge vers l'extérieur, en bleu vers l'intérieur).

Éthologie

Des outils de crocodile

Certains alligators et crocodiles se servent d'appâts pour chasser. Vladimir Dinets, de l'Université du Tennessee, aux États-Unis, et ses collègues ont observé que ces reptiles maintiennent volontairement des brindilles sur leur museau, afin d'attirer les oiseaux qui en ont besoin pour construire leur nid.

Les chercheurs avaient remarqué des crocodiles et des alligators dont le museau était tapissé de brindilles. Les animaux se déplaçaient très peu, prenant soin de ne pas les faire tomber, et se ruaient sur les oiseaux qui tentaient de s'en emparer. Hasard ou stratégie de chasse délibérée ? Pour le déterminer, les chercheurs ont observé les reptiles de façon systématique et montré qu'ils ne manifestent ce comportement que pendant la période de reproduction des oiseaux, en particulier quand ils construisent leur nid. Ce serait le premier cas avéré d'utilisation d'outils chez les reptiles.

→ Guillaume Jacquemont

V. Dinets et al., Ethology, Ecology & Evolution, en ligne le 29 novembre 2013

Paléontologie humaine

Un génome de 400 000 ans

Denisova est en Sibérie centrale; Sima de los Huesos, en Espagne. Pourtant, le génome mitochondrial d'un enfant mort à Denisova il y a 80 000 ans et celui d'un autre enterré dans la Sima de los Huesos il y a quelque 400 000 ans sont étonnamment proches, a constaté l'équipe de Matthias Meyer, de l'Institut Max Planck pour l'anthropologie évolutive de Leipzig, en Allemagne.

La morphologie de l'enfant de Sima de los Huesos invite à le rattacher à *Homo heidelbergensis*, dont seraient issus en Europe les Néandertaliens, il y a 200 000 ans. Malgré l'extrême difficulté de la reconstitution d'un génome divisé en centaines de milliers de microfragments perdus au milieu des millions de fragments d'ADN non humain issu des bactéries de la décomposition, les chercheurs sont parvenus à établir l'ordre de 16 302 des 16 500 nucléotides du génome des mitochondries de cet enfant. Ce génome, transmis uniquement par la mère, permet d'établir les filiations féminines.

Les chercheurs ont comparé cet ADN à celui des Néandertaliens, de l'enfant de Denisova, des hommes modernes et des

singes. Malgré les caractères pré-néandertaliens de l'enfant de la Sima de los Huesos, son génome mitochondrial s'est révélé plus proche de celui de l'homininé de Denisova. C'est surprenant, car on pense que cet homininé contemporain des Néandertaliens a occupé l'Asie orientale, tandis que l'homme de Néandertal occupait l'Eurasie occidentale. Plus proche génétiquement des Néandertaliens que des *Homo sapiens*, il aurait contribué, selon les chercheurs, à entre 4 et 6 pour cent du génome des Océaniens actuels, alors que l'homme de Néandertal aurait contribué à entre 1 et 4 pour cent des gènes des Eurasiens.

Comment s'explique la parenté génétique de lignées distantes de plus de 7 000 kilomètres et de 320 000 ans ? Selon les chercheurs, le scénario le plus plausible serait que les hominins de la Sima de los Huesos soient apparentés aux ancêtres communs des Néandertaliens (ce qui expliquerait leurs traits pré-néandertaliens) et des Denisoviens (ce qui expliquerait leur génome mitochondrial).

→ F. S.

Nature, en ligne le 4 décembre 2013



Les hominins de la Sima de los Huesos ont vécu il y a quelque 400 000 ans dans le Nord de l'Espagne.

Biophysique

Des koalas à la voix d'éléphant

La plupart des animaux ont des cris d'autant plus graves qu'ils sont gros, la hauteur sonore étant conditionnée par la taille des cordes vocales (et donc du larynx, qui les abrite). Or quand ils cherchent à attirer les femelles, les koalas mâles atteignent la même tonalité que les éléphants! Benjamin Charlton, de l'Université du Sussex, au Royaume-Uni, et ses collègues l'ont expliqué par l'existence de cordes vocales supplémentaires, dont la lon-

gueur n'est pas contrainte par celle du larynx.

La fréquence la plus basse, dite fondamentale, émise par les koalas mâles est en moyenne de 20 hertz. En recherchant l'adaptation anatomique en cause, les chercheurs ont découvert deux cordes vocales juste au-dessus du larynx, là où se rejoignent les cavités orale et nasale. Trois à cinq fois plus longues que celles du larynx, elles émettent des fréquences allant jusqu'à 10 hertz (le son

émis par une corde vibrante est d'autant plus grave qu'elle est longue).

C'est le premier organe producteur de son trouvé en dehors du larynx chez un mammifère terrestre. Le seul autre exemple connu est celui de certains cétacés, tels les dauphins, qui émettent de brefs claquements grâce aux vibrations de lèvres phoniques (des membranes situées dans leur tête).

→ G. J.

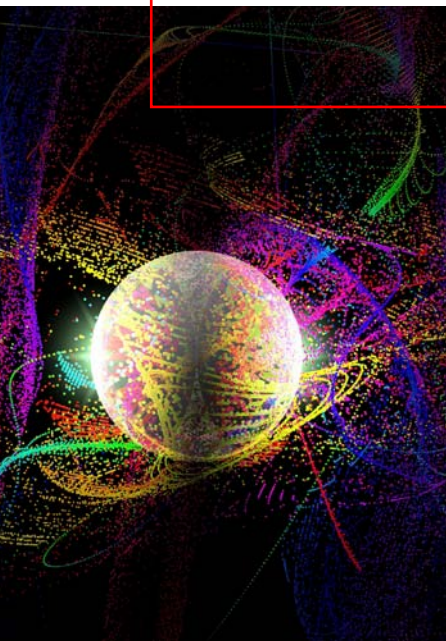
Current Biology, 28 novembre 2013



250 millions de tonnes : c'est la quantité de dioxyde de carbone qui serait absorbée chaque année par les régions côtières des océans.

Physique

Record de stabilité pour des bits quantiques



L'ordinateur quantique pourrait être l'ordinateur du futur. Mais de nombreuses difficultés restent à résoudre pour que cette technologie encore imaginaire devienne réalité. L'une d'elles est que, à température ambiante, les états quantiques sont détruits en quelques millisecondes et perdent ainsi l'information qu'ils portent. L'équipe de Mike Thewalt, de l'Université Simon Fraser, au Canada, vient de progresser sur ce point, en réussissant à conserver l'information d'un système quantique durant 39 minutes à une température de 25 °C.

L'ordinateur quantique se distingue des ordinateurs classiques par le fait que l'information n'est pas portée par des bits prenant l'état «0» ou «1», mais par des états quantiques, ou qubits, qui peuvent être des superposi-

tions d'états «0» et «1». Cette différence permet en principe de stocker plus d'information et de faire des calculs simultanés. Mais les qubits sont fragiles. La moindre perturbation extérieure peut détruire la superposition d'états d'un qubit, si bien que l'information liée à un tel état quantique est perdue – on parle de décohérence.

L'équipe de M. Thewalt a étudié un système où le qubit est constitué par le spin d'atomes de phosphore 31 pris dans un substrat de silicium 28. Le spin est un moment cinétique intrinsèque qu'un champ magnétique peut orienter. Si l'on définit les états «0» et «1» comme les orientations «vers le haut» et «vers le bas» du spin, le qubit, dans une superposition de ces états, correspond à un état de spin d'orientation intermédiaire.

Les physiciens ont identifié deux facteurs qui perturbent l'état de spin des atomes de phosphore et conduisent à la décohérence : la grande sensibilité de l'électron externe de l'atome de phosphore aux fluctuations du champ électrique dans le dispositif, et la présence dans le silicium naturel de l'isotope 29 à hauteur de cinq pour cent. Les chercheurs ont donc utilisé un substrat de silicium 28 pur et des atomes de phosphore ionisés. Les qubits ont été préparés à 4,2 kelvins, tous dans le même état. Puis le système a été chauffé jusqu'à la température ambiante. Les chercheurs ont montré que 30 pour cent des ions phosphore portaient toujours l'état quantique initial au bout de 39 minutes.

→ S. B.

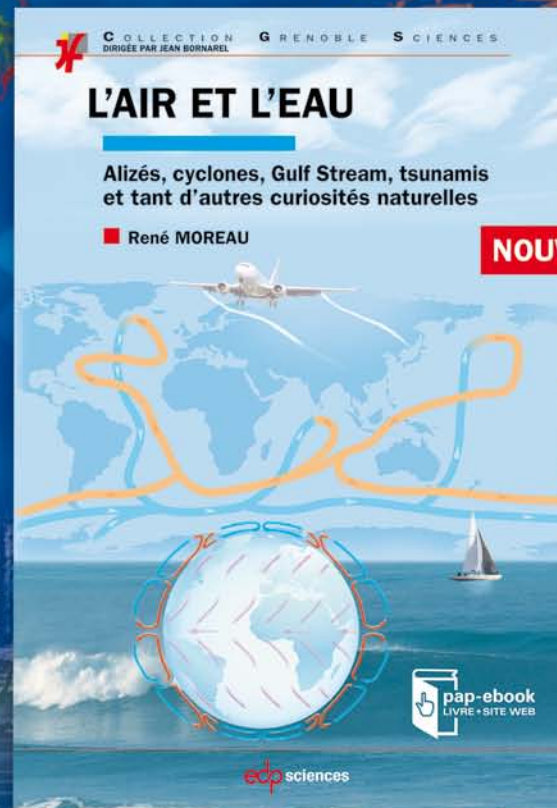
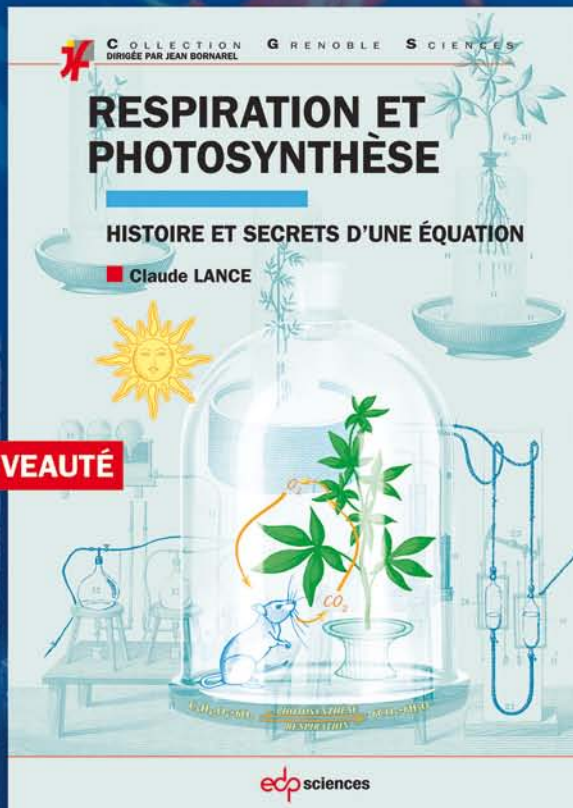
K. Saeedi et al., Science, vol. 342, pp. 830-833, 2013

Vue d'artiste d'un bit quantique, ou qubit.

GRENOBLE SCIENCES

■ CONSEIL ■ EXPERTISE ■ LABELLISATION ■ ÉDITION

GRENOBLE SCIENCES est un centre de conseil et d'expertise.
Le label *Grenoble Sciences* n'est attribué qu'aux ouvrages
ayant atteint la qualité scientifique et pédagogique optimale.



■ Pour cette fin d'année 2013,
Grenoble Sciences vous propose une sélection
de livres à glisser sous le sapin de Noël ! ...
(éditeur EDP Sciences)



... et d'autres ouvrages pour divers publics
à découvrir sur le site de Grenoble Sciences.

POUR COMMANDER

Ces ouvrages sont en vente dans le rayon Sciences des librairies ou sur internet :
<http://www.edition-sciences.com>

■ GRENOBLE SCIENCES

<http://www.grenoble-sciences.com>

Université
Joseph Fourier
GRENOBLE

Grenoble Sciences, Université Joseph Fourier, Bât. B de Phitem,
230 rue de la Physique – BP 53, 38041 Grenoble cedex 9
Tél. (33)4 76 51 46 95 – Fax. (33)4 76 51 45 79
Email : Grenoble.Sciences@ujf-grenoble.fr

Rhône-Alpes

Planétologie

100 000^e tir pour ChemCam

Les 100 000 analyses de roches martiennes déjà pratiquées par l'instrument ChemCam du rover Curiosity de la NASA révèlent la diversité géologique martienne. ChemCam détermine par spectroscopie sur un plasma créé par laser la composition chimique des roches jusqu'à sept mètres de distance du rover. L'instrument a d'abord prouvé que les roches martiennes sont faites des mêmes éléments que sur Terre. Il a aussi rendu possible la découverte de mugéarite, c'est-à-dire d'un basalte alcalin, dont la présence atteste que des maturations magmatiques sous forte pression et température élevée ont eu lieu sur Mars au cours d'une époque volcanique lointaine. Lorsqu'il a analysé des sédiments, ChemCam a révélé qu'il s'agissait d'argile du fond d'un lac. Même si ses données restent à exploiter pleinement, elles suggèrent que la planète rouge comportait des milieux susceptibles d'accueillir une vie microscopique – sans traces pour l'instant.

→ F. S.

Science, vol. 341, pp. 1475-1477, 2013



Une vue de Mars prise par la caméra optique du rover Curiosity.

Sciences sociales

Belles-mères bienveillantes

Le cas de Cendrillon, délaissée par sa belle-mère, est-il l'exception ou la règle? Une étude démographique menée par Alain Gagnon, de l'Université de Montréal, et un collègue apporte un éclairage inédit sur cette question.

Les chercheurs ont analysé la mortalité infantile consécutive au décès d'un parent, selon que le conjoint survivant se remariait ou non, dans deux régions: l'une où l'espace et les ressources manquaient (Krummhörn, en Allemagne, de 1720 à 1859) et l'autre où ils abondaient (le Québec de 1670 à 1750). L'arrivée d'une belle-mère augmentait la mortalité des enfants du père à Krummhörn, mais pas au Québec. Ainsi, les enfants adoptifs ne seraient délaissés par la belle-mère qu'en cas de compétition pour les ressources avec les enfants biologiques, et non de façon systématique.

→ G. J.

K. P. Willführ et A. Gagnon, Biodemography and Social Biology, en ligne le 12 novembre 2013

Géophysique

La course au pôle Sud du point chaud antarctique

Le secteur Ouest de l'Antarctique, face à l'océan Pacifique, porte une chaîne de volcans: la chaîne du Comité exécutif. Les études sismiques d'une équipe menée par Amanda Lough, de l'Université du Missouri, suggèrent que cette traînée de volcans a été créée par le déplacement vers le pôle Sud d'un point chaud.

On nomme point chaud une région où un volcanisme régulier résulte d'une infiltration importante de masses chaudes de magma à travers la croûte terrestre. Le secteur ouest-antarctique comporte de nombreux volcans, ce qui a conduit les chercheurs à soupçonner la présence d'un point chaud. Or, depuis plusieurs dizaines de millions d'années, l'activité volcanique a progressé au sein de la chaîne du Comité exécutif du Nord vers le Sud, mais sans que les traces d'une activité récente n'aient été découvertes.

Toutefois, en 2010 et 2011, deux séries d'événements sismiques ont été enregistrées, leur source se situant à 55 kilomètres du mont Waesche, le volcan le plus au Sud de la chaîne du Comité exécutif. A priori, ces séismes pouvaient être dus au déplacement de la plaque antarctique

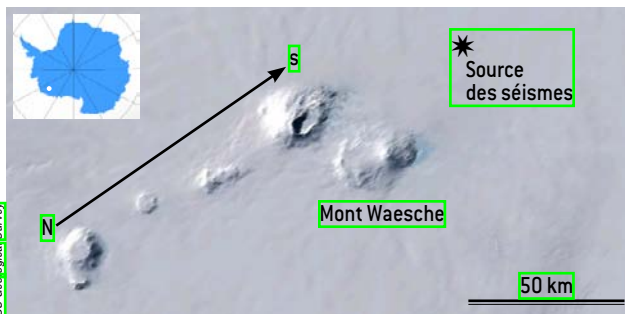
ou à celui de la calotte locale, ou avoir une origine volcanique. Toutefois, leurs fréquences et le fait qu'ils sont groupés en essaims localisés au même endroit suggèrent qu'ils signalent l'ascension de roche liquide sous un volcan en activité.

Les chercheurs ont donc examiné au radar la région située au Sud de la chaîne du Comité exécutif et découvert à 1 400 mètres sous la glace la présence d'une couche de cendres; d'après sa profondeur, cette couche daterait d'environ 8000 ans et aurait pour origine le mont Waesche, le plus jeune volcan. Ainsi, une activité volcanique récente à l'échelle géologique a bien eu lieu dans la chaîne du Comité exécutif.

Selon les géophysiciens, l'ensemble de ces observations indiquent un volcanisme toujours actif sous la chaîne du Comité exécutif, et qui continue à migrer vers le Sud. En d'autres termes, un point chaud a entrepris sa propre course au pôle, et sa présence pourrait influencer sur l'évolution de la très épaisse calotte ouest-antarctique: la remontée de magma correspondante pourrait faciliter son glissement.

→ F. S.

A. Lough et al., Nature Geoscience, en ligne le 17 novembre 2013



La chaîne volcanique du Comité exécutif (point blanc sur la carte) semble résulter de la migration d'un point chaud du Nord vers le Sud.

SciLogs

La nouvelle communauté de
blogueurs scientifiques francophones

Grâce à **Scilogs.fr**, dialoguez avec des chercheurs et acteurs du monde des sciences aux points de vue riches et variés. De blog en blog, explorez la science avec ceux qui la font, la décryptent, l'analysent : résultats de recherche, applications pratiques, perspectives insolites, débats éthiques et politiques... Pour vivre la science au quotidien !

Signal sur bruit

Richard Taillet
Astrophysicien,
professeur
chercheur
au LAPTh

Ecoblog

Vincent Devictor
Chercheur au CNRS
en écologie et biologie
de la conservation

Best of Bestioles

Loïc Mangin
Rédacteur en chef
adjoint
Pour la Science

Complexités

Jean-Paul Delahaye
Mathématicien, informaticien,
et auteur de la rubrique
Logique et calcul
dans *Pour la Science*

Retrouvez
aussi les autres
communautés
« SciLogs » : déjà
plus de 140 blogueurs
scientifiques
à l'international !

Psycho Info

Jérôme Palazzolo
Médecin psychiatre, à Nice
et à l'Université Internationale
Senghor, à Alexandrie,
en Égypte

L'actu sur le divan

Sébastien Bohler
Rédacteur
à *Cerveau & Psycho*

Alterscience

Alexandre Moatti
Polytechnicien, chercheur
en histoire des sciences
au laboratoire SPHERE



Connectez-vous
maintenant
pour découvrir
www.Scilogs.fr !



Suivez les dernières actualités
des blogueurs également
sur les réseaux sociaux

Proposé par **SCIENCE**

Préhistoire

Les cousins américains de l'enfant de Mal'ta

Apparentés aux Européens, les Sibériens du Paléolithique supérieur préglaciaire (35000 à 10000 ans avant notre ère) ont fortement contribué à la population amérindienne. C'est à cette conclusion qu'est parvenue une équipe internationale conduite par Maanasa Raghavan, du Muséum d'histoire naturelle du Danemark, après avoir séquencé le génome d'un enfant de la culture de Mal'ta.

Tirant son nom d'un site se trouvant le long d'une rivière près du village de Mal'ta, non loin du lac Baïkal, cette culture est connue pour ses tentes en peau semi-enterrées, soutenues et calées par des os de mammouth, des bois de cerfs et des pierres, et pour ses nombreuses vénus (figurines féminines) très proches des vénus européennes de même époque.

En 2009, les chercheurs ont prélevé 0,15 gramme d'un os d'enfant retrouvé dans l'une des tombes de la culture de Mal'ta, vieille de 24000 ans, puis ont séquencé son génome mitochondrial (contenu dans les mitochondries, des organites cellulaires) et le chromosome Y de son génome nucléaire. L'haplotype, c'est-à-dire l'ensemble d'allèles (versions particulières de gènes) caractéristiques d'une population et transmissibles, identifié dans le génome mitochondrial de l'enfant est l'haplotype U. Il est caractéristique des chasseurs européens du Paléolithique supérieur et du Mésolithique (10000 à 5000 ans) et se rencontre toujours souvent chez les Européens, mais très peu chez les Hans (Chinois). L'haplotype R identifié dans le chromosome Y de l'enfant est, lui, répandu en Eurasie occidentale, dans l'Altai (Mongolie) et en Sibérie du Sud, mais pas chez les Asiatiques d'Extrême-Orient. Or l'haplotype Q, dominant chez les Amérindiens, a évolué à partir de l'haplotype R...

Ainsi, les gens de la culture de Mal'ta sont liés génétiquement à la fois aux Européens et aux Amérindiens. Est-ce possible? Oui, si certains sont passés à pied en Amérique il y a 20000 ans, quand le détroit de Béring était à sec.

→ F. S.

R. Raghavan et al., *Nature*, en ligne le 20 novembre 2013

Astrophysique

La mort brillante d'une étoile

Le 27 avril 2013, un ensemble d'observatoires spatiaux (Fermi, Swift, NuSTAR) et de télescopes au sol (tel RAP-

TOR) ont enregistré un phénomène très brillant, celui d'un sursaut gamma exceptionnel par sa proximité. Les astrophysiciens ont pu étudier en détail son spectre électromagnétique.

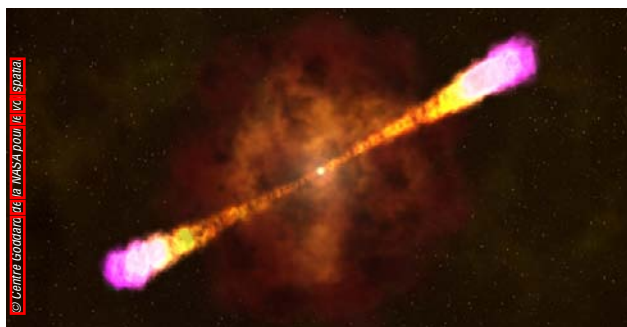
Les sursauts gamma (bouffées de rayons gamma) sont les événements les plus énergétiques observables dans le ciel. Ils surviendraient notamment quand des étoiles très massives s'effondrent sur elles-mêmes, leur cœur formant un trou noir. Deux jets de matière sont expulsés de part et d'autre du trou noir à des vitesses proches de celle de la lumière. Les astrophysiciens font appel au modèle dit de la

boule de feu pour décrire les différents mécanismes à l'œuvre dans l'émission, la propagation et l'interaction des jets. Dans ce modèle, des photons sont émis depuis le domaine radio jusqu'aux rayons X pendant des durées qui dépendent de leur énergie.

Or la détection par Fermi d'un photon de 32 gigaélectronvolts neuf heures après le début du sursaut n'est pas compatible avec ce que prévoit le modèle de la boule de feu. Le photon proviendrait donc de l'interaction du jet avec le milieu interstellaire. Une détection inattendue qui aide les astrophysiciens à améliorer leur modèle.

→ S. B.

A. Maselli et al., M. Ackermann et al., R. Preece et al., W. T. Vestrand et al., *Science*, en ligne le 21 novembre 2013



Vue d'artiste de la mort de l'étoile qui a provoqué le sursaut gamma d'avril 2013.

DERNIÈRE minute...

DES GEYSERS SUR EUROPE

Il y a quelques années, on rapportait l'observation de panaches de vapeur d'eau sur Encélade, une lune de Saturne. Lorenz Roth, de l'Université de Cologne, en Allemagne, et ses collègues ont observé le même phénomène sur Europe, un satellite de Jupiter. Le mécanisme semble identique : les forces de marées dues à Jupiter exercent des contraintes sur des failles qui s'ouvrent lorsque la lune est au plus loin de sa planète

et libèrent des geysers dont la hauteur atteint près de 200 kilomètres.

MIEUX PRÉVOIR LE RISQUE CARDIAQUE

Les médecins ne disposent pas de bons critères pour évaluer le risque d'une défaillance cardiaque grave chez leurs patients. D'après un suivi de 58 personnes sur plusieurs années, l'équipe de Robert Weiss, à l'Université Johns Hopkins aux États-Unis, propose un nouvel indicateur, en complément de ceux existants :

le flux cardiaque de créatine kinase, une enzyme liée au métabolisme de l'énergie du muscle cardiaque. Une augmentation du flux de une micromole par gramme et par seconde (il est de l'ordre de 3,5 chez un sujet sain) réduirait le risque de plus de 30 pour cent.

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



L'information scientifique de référence maintenant sur tablette et smartphone !



Téléchargez gratuitement
l'application sur App Store et Google Play.
Le 1^{er} numéro de *Pour la Science* est offert !



Disponible sur
App Store

DISPONIBLE SUR
Google play



Flashez ce QR code
avec votre mobile
ou votre tablette
pour télécharger
immédiatement
l'application.

Avec l'application « Pour la Science », retrouvez dès leur sortie
le mensuel *Pour la Science* à 5,49 € et son hors-série trimestriel
Dossier Pour la Science à 5,99 € en version numérique
optimisée pour tablette : lecture intuitive, sommaire interactif,
contenus enrichis, feuilletage hors connexion, etc.



Découvrez aussi l'application « Cerveau & Psycho » pour retrouver
le magazine *Cerveau & Psycho* et son hors-série *L'Essentiel Cerveau & Psycho*

POINT DE VUE

La Paillasse, utopie ou innovation ?

Pionnier en France du mouvement DoltYourself biology pour une science ouverte, le laboratoire communautaire La Paillasse cherche à rétablir un dialogue entre les biotechnologies et la société.

Adrien CLAVAIROLY et Thomas LANDRAIN

Début 2014, grâce au soutien de la mairie de Paris, La Paillasse s'installe dans la capitale. Cette association à but non lucratif propose à tous de s'initier gratuitement à l'expérimentation en biologie dans un laboratoire équipé de matériel de récupération. Prônant une réappropriation du vivant par les citoyens, elle milite pour une recherche scientifique démocratique, ouverte et au bénéfice du plus grand nombre. Lieu d'échange interdisciplinaire sans discrimination de diplôme ou de revenu, elle offre un cadre juridique et éthique pour mettre en œuvre, de façon collaborative, des projets de biotechnologie en libre accès, fondés sur la non-brevetabilité du vivant et des techniques.

Utopie ? Peut-être, mais depuis son ouverture en 2011 dans un hangar à Vitry-sur-Seine, La Paillasse, qui compte une trentaine de membres, a fait germer plus d'une dizaine de projets allant d'un transilluminateur à bas coût (pour observer l'ADN) à la production d'encre biodégradable par des bactéries. Lieu de débat, elle propose aussi des ateliers d'initiation à la génétique.

Pourquoi une telle structure, dans un paysage scientifique français déjà bien fourni ? L'aventure est née de plusieurs constats. D'une part, les biotechnologies ont un impact grandissant sur la société, qu'il s'agisse des organismes génétiquement modifiés (OGM) ou du séquençage du génome proposé à tout un chacun, et il devient difficile au citoyen de se tenir informé de leurs développements

et de comprendre leurs enjeux. D'autre part, les politiques scientifiques, fondées sur la compétitivité, soumettent les instituts de recherche à de lourdes contraintes d'investissements faits au détriment de la création d'emplois, tout en freinant la créativité et la prise de risque. Enfin, l'innovation est pénalisée par une course aux brevets et par les situations de monopole associées.

La Paillasse s'inscrit dans le mouvement mondial de science participative *DoltYourself biology* ou *DIYbio*, né aux États-Unis en 2008. Ce mouvement en expansion regroupe plus de 5 000 personnes autour d'une quarantaine

INCUBATEURS D'IDÉES,
les laboratoires *DIYbio* sont à la croisée
des sphères créative, académique
et entrepreneuriale.

de laboratoires communautaires tels que *Genspace* à New York, *Biocurious* en Californie ou *Madlab* à Manchester, en Angleterre. L'association s'inscrit aussi dans la mouvance des *fab labs*, un réseau d'ateliers ouverts au public, où toutes sortes d'outils, en général dédiés à l'électronique et à la robotique, sont mis à disposition. Né aux États-Unis dans les années 1990, ce mouvement rassemble plus de 150 ateliers dans le monde. Propices aux collaborations interdisciplinaires, ces lieux favorisent l'innovation et la production à cycle court à l'aide d'imprimantes 3D, des machines qui produisent couche par couche des pièces tridimensionnelles.

La Paillasse adhère à la charte *DIYbio* de transparence, sécurité et responsabilité rédigée par la communauté *DIYbio* en 2011 et se place dans un cadre légal et éthique qui interdit à ce jour toute expérimentation animale et toute modification génétique. Elle répond à un cahier des charges établi en dialogue avec le comité d'éthique de l'INSERM afin d'éviter les dérives observées ailleurs, telles que la dissémination d'OGM par un projet *DIYbio* de plante transgénique lumineuse pour remplacer l'éclairage public (*Glowing Plant Project*) ou le diagnostic par test génétique hors de tout cadre légal. Il s'agit aussi de s'opposer au mouvement transhumaniste, qui prône l'usage des techniques pour améliorer l'espèce humaine.

L'association s'équipe peu à peu en matériel de haute technologie grâce au soutien d'instituts de recherche publics et privés, tels *Genopole*, à Évry, ou l'Institut du cerveau et de la moelle épinière (ICM), à Paris, qui ont répondu à la Campagne des biocheneurs, campagne nationale de récupération de matériels et de consommables lancée il y a quelques mois.

Le travail est bénévole. Venus de tous horizons – biologie, informatique, physique, chimie, art, design, sciences humaines, électronique –, les membres sont des étudiants, des doctorants ou des chercheurs ou de simples curieux passionnés de biologie et rémunérés par ailleurs. Les projets sont sélectionnés par vote sur proposition des membres, et sont suivis lors de réunions hebdomadaires

et grâce au site Web de l'association. Ils sont financés de diverses façons : autofinancement, réponse à des appels à projets (le prototypage d'un bioréacteur domestique a ainsi été financé par le programme spatial *Space Gambit*, lui-même collaboratif), sponsors, mécénat, appels à financement participatif, prestations de service pour des laboratoires publics (prototypage de nouveaux outils, bio-informatique, analyses). Les fonds collectés depuis l'ouverture s'élèvent à environ 100 000 euros. Les résultats à valeur scientifique seront soumis aux revues scientifiques à comité de lecture en accès libre, telle *PLoS ONE*, afin de favoriser leur diffusion.

Avec encore peu de publications scientifiques à son actif, le mouvement *DIYbio* reste perçu avec curiosité et scepticisme par la science académique. Néanmoins, une conver-

gence d'intérêt se dessine. Depuis 2012, une fronde mondiale contre les éditeurs scientifiques à portail payant rassemble toujours plus de scientifiques prônant le libre accès aux données et aux recherches. Le soutien apporté par des chercheurs et des institutions de recherche témoigne aussi d'une volonté de développer ce mouvement.

La viabilité à long terme des laboratoires *DIYbio* dépendra bien sûr du dynamisme des bénévoles et du succès des démarches de financement. La pérennisation de *La Paillasse* dépendra ainsi des réponses obtenues aux appels à projets (dont ceux mis en place par le ministère du Redressement productif et la région Île-de-France sur la création de *fab labs*). L'aide à la création de start-up issues des projets menés par ses membres est aussi à l'étude.

La science ouverte répond d'une nouvelle façon à des questions sur le vivant soulevées par les citoyens (agriculture urbaine, analyse de biodiversité, dépollution des sols à l'aide du vivant...). Incubateurs d'idées à la croisée des sphères créative, académique et entrepreneuriale, les laboratoires *DIYbio* font le lien entre elles. En France, le mouvement fait déjà des émules : grâce aux équipements récupérés, de nouvelles *Paillasses* s'organisent à Bordeaux et à Lyon.

Adrien CLAVAIROLY est doctorant à l'ICM, à Paris, et membre de *La Paillasse*. **Thomas LANDRAIN** est doctorant au Genopole d'Évry et président de *La Paillasse*. lapaillasse.org ; diybio.org



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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Huile de palme : vers une filière durable ?

La culture des palmiers à huile, première source mondiale d'huile végétale, est un facteur majeur de développement des pays du Sud. Mais elle doit être mieux contrôlée afin, notamment, de réduire son impact environnemental.

Alain RIVAL et Patrice LEVANG

L'huile de palme représente un tiers des huiles végétales produites dans le monde. Elle entre dans la composition de produits variés : préparations alimentaires, cosmétiques, savons, biodiesels, etc. Cependant, son succès est controversé : facteur majeur de développement dans les pays du Sud, elle est notamment accusée de nuire à la santé et à l'environnement. Comme tant d'autres, cette controverse se nourrit de simplifications à outrance et d'attaques caricaturales. Essayons d'y voir plus clair.

Apparue récemment dans les régimes alimentaires du Nord, l'huile de palme est

encore mal connue sur le plan nutritionnel. Les travaux concernant son impact sur la santé sont souvent contradictoires, ce qui s'explique par leur incapacité à intégrer l'ensemble des facteurs liés aux régimes alimentaires et aux styles de vie ; en outre, les résultats obtenus sur des modèles animaux restent difficilement transposables à l'homme. On sait que l'huile de palme abonde en acides gras dits saturés, en particulier en acide palmitique. Or certaines études épidémiologiques et cliniques montrent qu'un apport élevé de ces acides peut, dans certains cas, augmenter le risque cardiovasculaire. Cependant, d'autres études concluent à un

effet faible ou nul. Une méta-analyse, publiée en 2010 par Patty Siri-Tarino, de l'Institut de recherche d'Oakland, aux États-Unis, n'a pas conclu à une dangerosité spécifique des acides gras saturés. Pour ceux qui souhaitent malgré tout éviter l'huile de palme, une réglementation européenne rend obligatoire de préciser la nature des huiles végétales sur les produits qui en contiennent à partir de décembre 2014.

Quoi qu'il en soit, dans les pays du Nord, l'huile de palme est loin d'être la source principale d'acides gras saturés, qui ont des origines multiples (beurre, fromage, charcuterie, etc.). En France, elle fournirait à



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

POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence
de l'actualité scientifique

peine deux pour cent de ces acides. Boycoter simplement l'huile de palme ne résoudra rien et sa consommation doit être intégrée au problème plus général de la sédentarité et de la suralimentation, à l'origine de l'augmentation du risque cardiovasculaire. Quand ils ne sont pas consommés en excès, les acides gras sont bénéfiques pour l'organisme, auquel ils fournissent de l'énergie et des vitamines (l'acide palmitique est d'ailleurs un constituant du lait maternel).

Qu'en est-il des impacts environnementaux ? Le palmier à huile (*Elaeis guineensis*) est originaire des grandes forêts tropicales bordant le golfe de Guinée, en Afrique de l'Ouest. Il est cultivé dans les pays tropicaux (l'Indonésie et la Malaisie assurent 87 pour cent de la production) et le problème ne vient donc pas de l'implantation de l'arbre dans un milieu qui n'est pas adapté pour l'accueillir, mais plutôt de la façon dont l'expansion de sa culture a été gérée.

Cette expansion a eu un impact environnemental désastreux : de vastes portions des forêts tropicales, qui constituent de fantastiques réservoirs de biodiversité, ont été converties en monocultures. Cependant, à encore le problème n'est pas le palmier à huile lui-même, mais plus généralement la déforestation à visée agricole. Les industriels du secteur soutiennent d'ailleurs qu'il minimise la déforestation, du fait de son haut rendement (huit fois supérieur à celui du soja, la deuxième source d'huile dans le monde).

En réponse à l'accroissement démographique et à l'élévation du niveau de vie dans les pays émergents, la croissance du secteur de l'huile de palme devrait se poursuivre pendant plusieurs décennies, en partie au détriment de la forêt tropicale. En Afrique centrale surtout, il est illusoire d'espérer maintenir le couvert forestier au niveau actuel. Le rattrapage du déficit de développement y prime sur la protection de la nature.

Cependant, cette expansion peut être limitée et encadrée. Avant de sacrifier davantage de forêts primaires, il faut convertir en palmeraies des zones déjà déforestées ou dégradées et intensifier la production dans les palmeraies existantes, notamment via la

diffusion de plants à haut rendement et une fertilisation raisonnée. En Malaisie, où les sols sont pourtant fertiles et les conditions climatiques favorables, le rendement moyen est de moins de quatre tonnes par hectare, ce qui est loin des meilleures performances enregistrées dans le pays (six à sept tonnes par hectare). En Afrique, les marges de progrès sont énormes : au Cameroun, par exemple, le rendement moyen des palmeraies villageoises n'atteint que le quart de celui obtenu par les petits planteurs indonésiens.

Plus généralement, une stratégie d'expansion durable de la filière de l'huile de palme doit être mise en place. Outre l'intensification des cultures, elle devra

AU CAMEROUN, LE RENDEMENT MOYEN
n'atteint que le quart de celui obtenu
par les petits planteurs indonésiens.

promouvoir la certification RSPO (*Roundtable on Sustainable Palm Oil*, ou Table ronde sur l'huile de palme durable), mise en place en 2005 ; inclure les petits planteurs dans les complexes agro-industriels ; informer les peuples autochtones et recueillir leur consentement ; impliquer les gouvernements dans les questions légales, notamment relatives à l'acquisition des terres.

Les bailleurs de fonds internationaux et les ONG s'accordent à donner à la culture du palmier à huile un rôle incontournable dans l'éradication de la pauvreté dans les pays tropicaux. En moins d'un siècle, on est passé d'une culture vivrière mineure en Afrique à une production agricole massive et mondiale, et cette expansion se poursuit. Mal gérée, elle risque de se traduire par la disparition de forêts riches en biodiversité et par des impacts négatifs sur les populations locales et les communautés indigènes. L'ensemble des acteurs de la filière doit donc se préoccuper dès aujourd'hui de l'encadrer. ■

Alain RIVAL coordonne les recherches sur les palmiers à huile au CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement). Patrice LEVANG est directeur de recherche à l'IRD (Institut de recherche pour le développement).
A. Rival et P. Levang, *La palme des controverses*, Éditions Quæ, 2013.

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

FORUM HORIZON CHIMIE

Jeudi 6 février 2014
9h00/18h00

Une rencontre privilégiée avec une quarantaine d'entreprises et l'opportunité de postuler à des offres de stage et d'emploi dans des domaines allant de l'énergie à l'agro-alimentaire, en passant par la cosmétique, le secteur pharmaceutique, les sciences des matériaux et les biotechnologies.

Stands d'exposition, conférences, tables rondes, simulations d'entretiens d'embauche et corrections de CV seront mis en place afin de vous aider à approfondir votre projet professionnel et faciliter votre entrée dans le monde du travail.

Pour plus de renseignements :
www.horizon-chimie.fr

**28^e
édition**

Entrée libre

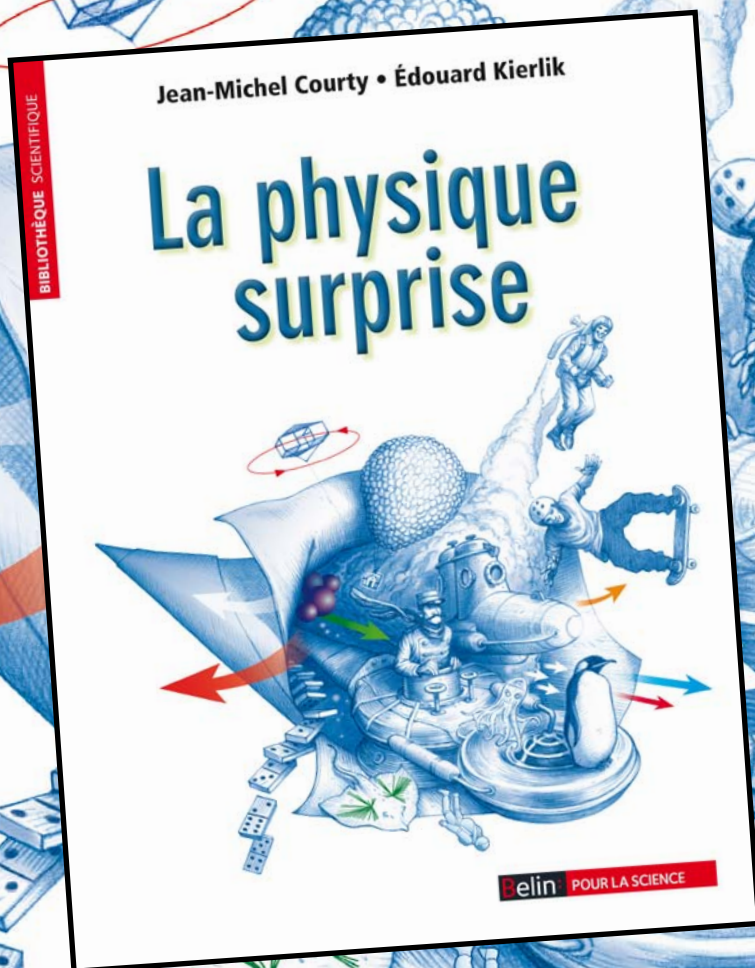
Maison de la Chimie
28 bis rue Saint-Dominique
75007 Paris
Métro Invalides



La physique

surprise

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



Que nous réserve cette Physique surprise ? Trente-neuf pièces à déguster sans modération, mitonnées par les auteurs. Le style et les croquis, l'actualité et la variété des thèmes vous séduiront, vous amuseront, vous surprendront. Oui, on peut franchir le mur du son en chute libre. Non, les veines ne sont pas bleues. Oui, on peut séparer le chaud et le froid dans un courant d'air. Alors... Bon appétit !

Éditions Belin/Pour la Science 2013
184 pages – 24 euros
ISBN 978-2-8425-5121-9

BON DE COMMANDE

à découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil • Tél. : 0 805 655 255 • e-mail : pourlasciencevpc@daudin.fr

POUR LA SCIENCE

☐ Oui, je commande l'ouvrage **La physique surprise** de J.-M. Courty et É. Kierlik.

..... exemplaires × 24,00 € (Réf. 075121) = ... €
Frais de port (4,90 € France – 12 € étranger) + ... €
TOTAL À REGLER = ... €

Je choisis mon mode de règlement :

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

J'indique mes coordonnées :

Nom :
Prénom :
Adresse :

Numéro
Date d'expiration
Cryptogramme

Signature obligatoire

C.P. : Ville :
Pays : Tél. :

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

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

PSPLS435

VRAI OU FAUX

Deux individus d'espèces différentes sont-ils interféconds ?

Dans certains cas, oui. Les hybrides peuvent même être fertiles, ce qui complique la définition des espèces.

Hervé Le Guyader

Si la notion d'espèce paraît intuitive, elle pose en réalité des difficultés majeures. Aujourd'hui, la plupart des biologistes s'accordent à définir une espèce comme un groupe d'individus interféconds et isolés des autres sur le plan de la reproduction. Cette définition semble indiquer que des couples formés d'individus n'appartenant pas à la même espèce ne peuvent pas procréer. Pourtant, l'existence d'hybrides indique une réalité plus nuancée.

En pratique, les biologistes se fondent sur un ensemble de critères pour rattacher des individus à la même espèce : même habitat, ressemblances morphologiques, physiologiques, génétiques, comportementales, etc. Les études qui ont conduit à inclure le critère d'isolement reproductif – et à fonder la définition de l'espèce sur lui – concernent surtout certains groupes, tels les oiseaux, les mammifères, les papillons ou les escargots.

En dehors de ces groupes, la situation est plus confuse. Ainsi, chez les plantes à fleurs, des espèces différentes se croisent fréquemment, en particulier au sein d'un même genre. De nombreuses espèces cultivées sont des hybrides. C'est le cas par exemple des choux (genre *Brassica*). Chez les bactéries, l'existence d'une parasexualité (un échange de matériel génétique par des ponts cytoplasmiques) a permis de généraliser le concept d'espèce. Néanmoins, l'observation d'importants échanges de gènes par des transferts dits horizontaux, surtout *via* des virus, rend problématique une telle généralisation.

Même au sein des groupes « modèles », des croisements interspécifiques existent.

Les exemples sont nombreux : le zébrule résulte du croisement d'un cheval et d'un zèbre, le turkoman de celui d'un chameau et d'un dromadaire, etc. Souvent, les hybrides sont stériles, donc incapables de transmettre leur patrimoine génétique. Buffon l'avait déjà souligné pour les mulets, issus d'un croisement entre un cheval et un âne. Cependant, les hybrides peuvent aussi être fertiles. C'est le cas des tigrons, nés d'un tigre et d'une lionne : ils peuvent se reproduire avec les tigres, les lions et les tigrons !

Des hybrides fertiles nés en milieu naturel

Le plus souvent, de tels croisements n'ont lieu qu'en captivité et sont plus ou moins artificiellement provoqués. Parfois, des hybrides fertiles naissent en milieu naturel, ce qui brouille encore plus les frontières. En Afrique, l'éléphant de savane et l'éléphant de forêt ont longtemps été rassemblés dans la même espèce, dont ils étaient considérés comme deux sous-espèces (*Loxodonta africana africana* et *Loxodonta africana cyclotis*), car ils pouvaient se croiser. En 2001, le généticien américain Alfred Roca et ses collègues du Kenya ont montré qu'il n'y a pas eu de brassage génétique significatif entre les deux groupes, que l'on doit donc classer en deux espèces distinctes. En d'autres termes, leurs hybrides sont si rares que l'on considère qu'il y a isolement reproductif, même si les représentants des deux groupes ont la possibilité physiologique de se croiser.



De même, les ours blancs (*Ursus maritimus*) et les grizzlis (*Ursus arctos horribilis*, une sous-espèce des ours bruns) appartiennent à deux espèces différentes, mais peuvent produire des hybrides fertiles. Une série de travaux de phylogénie moléculaire (l'étude des relations de parenté à partir de l'analyse des séquences d'ADN) ont même montré que les ours blancs actuels sont issus d'une hybridation entre leurs anciennes populations et les grizzlis, il y a 12 000 ans. Ainsi, une lignée d'hybrides fertiles peut donner lieu à une espèce à part entière.

Les espèces physiologiquement interfécondes sont donc plus nombreuses que prévu. Dans la plupart des cas, cependant, les croisements restent rares, pour des raisons variées. Elles sont par exemple comportementales (absence d'attraction entre les individus) ou écologiques (les deux espèces n'ont pas le même habitat ou, dans le cas des plantes, les mêmes insectes pollinisateurs). Ces barrières reproductives peuvent changer, ce qui conduit à des frontières fluctuantes entre les espèces.

Définir ces frontières n'est pas seulement une marotte de biologistes : c'est un paramètre clef des politiques de protection de la faune et de la flore. En effet, deux populations distinctes doivent être traitées indépendamment si elles appartiennent à des espèces différentes, et les hybrides ne sont pas pris en compte par ces politiques.

Hervé LE GUYADER est professeur à l'Université Pierre et Marie Curie et directeur du Laboratoire Systématique, adaptation, évolution (CNRS-UPMC-MNHN).

Angkor

genèse d'une mégalopole

Connue pour ses temples et statues au cœur de la forêt cambodgienne, Angkor se révèle avoir été un vaste complexe urbain mêlant pratiques religieuses, agriculture, réseaux hydrauliques et échanges commerciaux.

Ch. Pottier, P. Bâty, J.-B. Chevance et J. Estève

Découverte pour le monde occidental au milieu du XIX^e siècle, la cité d'Angkor est célèbre pour ses monuments en pierre ornés de statues, de sculptures et d'inscriptions gravées, perdus dans l'arrière-pays cambodgien. Pendant plus d'un siècle de présence archéologique française à Angkor, durant lequel se sont succédé explorateurs, épigraphistes, architectes et archéologues, l'attention s'est surtout portée sur les inscriptions et les temples – les vestiges visibles. Les inscriptions traitant essentiellement des affaires des temples – divinités, fondateurs souvent royaux –, la reconstruction de l'histoire khmère qui avait été ensevelie, avec ses temples, dans la forêt, était surtout une histoire religieuse articulée autour des dynasties royales.

Depuis la réouverture du site d'Angkor il y a une vingtaine d'années, une nouvelle génération d'archéologues s'intéresse à d'autres aspects de la civilisation angkorienne, notamment l'histoire de l'aménagement de la région d'Angkor et l'urbanisme de ses capitales successives. Couplées aux approches classiques telles que l'étude des inscriptions et l'analyse architecturale, de nouvelles techniques et méthodes sont désormais à l'œuvre sur le terrain, permettant des découvertes qui complètent notre connaissance d'Angkor et des grands sites voisins. Elles touchent tant à la genèse de cette cité qu'à sa nature même : elles montrent, d'une part, que le site a été occupé bien plus tôt qu'on ne le pensait

© Matthew Williams - iusrober - Hard to Write - iagenix.com

et, d'autre part, qu'à son apogée, entre les IX^e et XIV^e siècles, Angkor était une vaste mégapole établie sur un réseau hydraulique complexe.

L'histoire reconstituée d'après les rares sources épigraphiques et monumentales fait naître Angkor au début du VIII^e siècle, avec le roi Jayavarman II. Une inscription plus tardive relate notamment comment ce roi, alors jeune prince khmer, était rentré de Java (dont on débat encore pour savoir s'il s'agit ou non de l'île de Java actuelle) et avait unifié le pays khmer divisé. Ce royaume était connu des Chinois sous le nom du royaume du Tchenla et s'étendait du Cambodge jusqu'au Nord-Est de l'actuelle Thaïlande et au Sud du Vietnam. Au fil de ses pérégrinations qui réunifièrent diverses principautés, Jayavarman II régna en diverses villes et finit sa vie à Hariharâlaya – une cité identifiée par les inscriptions dans la région de Roluos, à une quinzaine de kilomètres au Sud-Est d'Angkor.

Mais Jayavarman II restera surtout célèbre pour avoir été sacré souverain universel en 802 sur le Mahendraparvata, l'actuel plateau de Phnom Kulen qui domine la plaine d'Angkor au Nord-Est. Jayavarman II apparaît non seulement comme le premier « roi suprême » à régner à Angkor, mais aussi et surtout comme le créateur de la royauté angkoriennne, de ses titres et de certains cultes qui ont perduré lors des dynasties ultérieures. Avec lui commence, pour les historiens, la période angkoriennne où se succèdent les capitales dans la région d'Angkor, jusqu'à son abandon au XV^e siècle, pour des causes multiples (émergence des puissances voisines, évolution des réseaux marchands, altération des infrastructures, variabilité des moussons), mais selon un processus encore énigmatique.

Pourtant, les vestiges matériels de cette histoire sont rares et méconnus : alors que deux des résidences de Jayavarman II

L'ESSENTIEL

■ **Jusque dans les années 1990, l'archéologie angkoriennne se concentrait sur l'étude des temples et des inscriptions.**

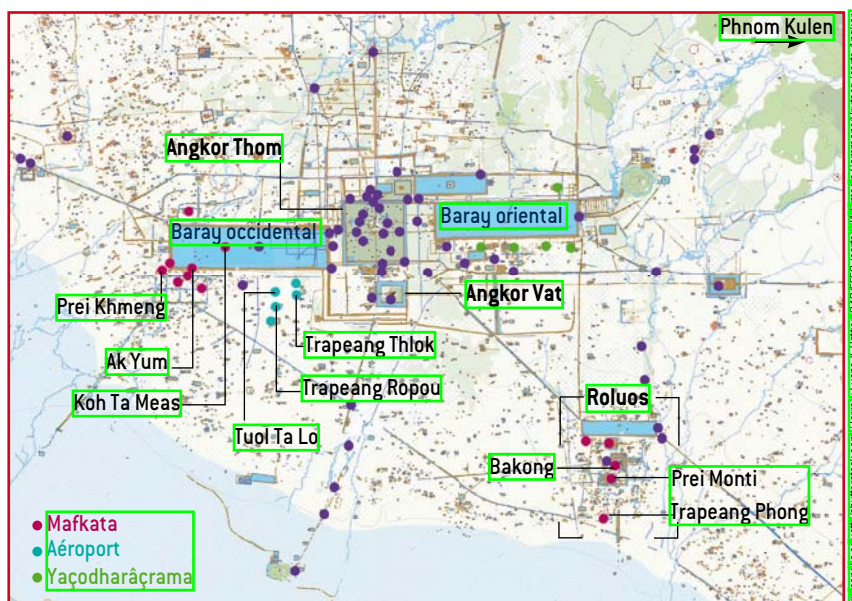
■ **Depuis une vingtaine d'années, de nouvelles méthodes permettent de préciser l'histoire de l'aménagement d'Angkor et son urbanisme.**

■ **Un vaste réseau d'agglomérations, de chaussées, de rizières et d'installations hydrauliques se dessine autour des temples, faisant d'Angkor une imposante mégapole.**

1. COMME LA PLUPART DES TEMPLES D'ANGKOR, le temple d'Angkor Vat est entouré d'une douve rectangulaire, reliée au vaste réseau hydraulique d'Angkor par des canaux et des digues.



2. LE SITE D'ANGKOR, au Cambodge, s'étend bien au-delà de ses principaux monuments, les temples d'Angkor Vat, d'Angkor Thom, comme le montrent les digues et tertres (ci-contre en marron) et les bassins et canaux (en bleu) repérés par l'étude topographique du terrain. De nombreuses missions sont en cours depuis 1992 (points) pour compléter ces données.



ont été localisées à Roluos et au Phnom Kulen, aucune inscription n'a pour l'instant permis d'attribuer avec certitude le moindre édifice à ce souverain, ni même à son successeur et fils Jayavarman III. Cette méconnaissance ne concerne pas seulement leurs règnes, de 802 à 877. Elle s'étend aussi bien avant, puisque quelques inscriptions et monuments importants datant de la fin du VII^e siècle (avant la naissance attribuée à Angkor) ont aussi été retrouvés dans la région, sans que l'on sache à quelle cité ou capitale ils correspondent. De fait, pendant deux siècles environ, des noms de rois et de cités, de capitales éphémères, sont associés à Angkor, sans qu'il n'ait été possible pour l'instant de les relier à des vestiges du site.

Comme Jayavarman II, ses successeurs ont fait construire dans la région d'Angkor des temples monumentaux dont certains, pyramidaux, au cœur de leurs capitales successives. Ils les ont associés à une quantité croissante d'infrastructures telles que d'immenses réservoirs (les *baray*), des bassins, et des réseaux de chaussées et de canaux... Certains sont désormais célèbres, tels Suryavarman II (1113-env. 1150), bâtisseur d'Angkor Vat qui reste l'apogée de l'architecture khmère, et Jayavarman VII (1181-env. 1215), souverain bouddhiste fondateur de la dernière capitale, Angkor Thom, carré parfait de trois kilomètres de côté centré sur le temple du Bayon aux fameuses tours à visages.

Mais depuis les années 1990, alors qu'une équipe de l'École française d'Ex-

trême-Orient (EFEO) dirigée par Jacques Gaucher explorait l'enceinte d'Angkor Thom et y mettait au jour les traces d'un dense réseau urbain constitué de tertres, de bassins et de voiries, une seconde équipe de l'EFEO menée par l'un de nous (Christophe Pottier) renouvelait la cartographie archéologique de ces capitales. Complétée en collaboration avec l'Université de Sydney, cette carte montre combien, au-delà de la concentration des grands temples, Angkor était constituée d'une myriade de fondations pieuses plus modestes, de villages, de bassins, de parcelles de rizières, façonnant une imposante mégalopole qui s'étendait sur quelque 1 000 kilomètres carrés.

Sur la piste d'une mégalopole

Depuis l'inscription d'Angkor sur la liste du patrimoine mondial en 1992, avec la coopération du Cambodge et de son Autorité pour l'aménagement et la sauvegarde de la région d'Angkor (APSARA), plus d'une quinzaine de programmes archéologiques se sont développés, dont plusieurs missions s'attachent à comprendre les diverses facettes de l'organisation complexe et de l'histoire des aménagements opérés par la civilisation angkorienne (voir la figure 2).

C'est notamment le cas de la mission Mafkata (Ch. Pottier/EFEO) qui a pour objectif d'étudier l'apparition de la centralisation et de la géométrisation des cités angkoriennes. Le passage à cette organi-

sation semble avoir marqué la genèse de l'urbanisme d'Angkor entre les premières occupations humaines et le X^e siècle. Le programme de recherches archéologiques sur les sites de Phnom Kulen (Jean-Baptiste Chevance/Archaeology & Development) vise quant à lui à étudier l'ancienne cité de Mahendraparvata qui s'est développée sur le plateau de Phnom Kulen, au Nord-Est de la région d'Angkor, et qui semble avoir été une des capitales marquantes du règne de Jayavarman II et des débuts de la période angkorienne.

La mission Yaçodharâçrama (Julia Estève et Dominique Soutif/EFEO) examine les *âçrama*, des lieux d'asile et de retraite spirituels construits par le roi Yaçovarman I^{er} à la fin du IX^e siècle et répartis sur tout le territoire angkorien. Et les fouilles préventives de l'aéroport de Siem Reap (Pierre Bâty/INRAP), à l'Ouest d'Angkor Vat, étudient des installations villageoises construites en périphérie d'Angkor entre les IX^e et XIV^e siècles. Centrées sur l'étude des habitats d'un point de vue chronologique, morphologique et économique, elles visent aussi à comprendre les interactions de ces différents groupes d'habitats avec les temples et les champs qui leur sont associés.

Toujours en cours, ces missions, qui mêlent les fouilles archéologiques, le recueil sur le terrain de données et d'artefacts et leur analyse, la télédétection et le balayage de la région par LiDAR hélicoptère (un faisceau laser infrarouge qui, en se réfléchissant sur le relief depuis un hélicoptère,

fournit un modèle topographique précis du terrain), offrent dès à présent une vision plus claire de l'histoire d'Angkor et de son organisation.

Une longue occupation avant Angkor

Tout d'abord, il apparaît que le site d'Angkor s'est établi dans une région loin d'être vierge, occupée depuis les périodes préhistoriques. Les premières campagnes de fouilles de la mission Mafkata, en 2000-2005, ont en effet mis au jour deux nécropoles préhistoriques dans la région du Baray occidental – un immense réservoir de huit kilomètres sur deux creusé au XI^e siècle. La première, Prei Khmeng, a permis d'étudier et de dater du VI^e siècle les débuts de l'hindouisation à Angkor : un des premiers temples brahmaniques construits dans la région y est superposé sans interruption à des occupations domestiques et funéraires remontant jusqu'au début de notre ère. La seconde, Koh Ta Meas, au cœur même du baray, est encore plus ancienne : datant de l'âge du bronze, elle atteste d'une occupation humaine à Angkor depuis presque 4000 ans.

Au-delà de ce pan préhistorique, les fouilles de la Mafkata ont aussi confirmé

LES AUTEURS

Christophe POTTIER est architecte et archéologue à l'École française d'Extrême-Orient (EFO). Il dirige la mission Mafkata.

Pierre BATY est archéologue à l'Institut national de recherches archéologiques préventives (INRAP). Il dirige les fouilles préventives de l'aéroport de Siem Reap.

Jean-Baptiste CHEVANCE dirige le programme Phnom Kulen de la Fondation *Archaeology & Development*.

Julia ESTÈVE est cofondatrice, avec Dominique Soutif, du projet Les ermitages de Yaçovarman I^{er}, au sein de l'EFO.

que le Baray occidental a été implanté sur l'emplacement d'une première cité antérieure à l'arrivée de Jayavarman II, centrée sur le temple d'Ak Yum. Quasi intégralement enseveli par la digue Sud du baray, ce temple pyramidal découvert dans les années 1930 par l'architecte français Georges Trouvé constitue le premier exemple de temple montagne caractéristique des capitales angkoriennes. Les nouvelles fouilles sur ce site ont permis d'obtenir une série de datations radiométriques qui suggèrent que son installation remonte à la fin du VI^e siècle, soit un siècle avant sa plus ancienne inscription et au tout début de l'histoire khmère, à l'époque des premiers souverains connus.

Autour d'Ak Yum, les fouilles continuent de porter sur plusieurs sites contemporains et révèlent l'étendue des aménagements de cette cité dont certaines caractéristiques – plan ouvert centré sur une pyramide, ouvrages hydrauliques en amont – annoncent déjà l'urbanisme angkorien. Il s'agirait ainsi d'une première capitale du royaume, mais on en ignore encore le nom. Les travaux se poursuivent, ce qui permettra peut-être d'y identifier l'une des anciennes cités préangkoriennes non localisées mentionnées sur les inscriptions.

Mahendraparvata, la cité perdue de Phnom Kulen

Le plateau de Phnom Kulen, la « montagne aux lychees », au sommet d'un massif situé à environ 40 kilomètres au Nord-Est d'Angkor, est une région unique du territoire angkorien. Situé à une altitude moyenne de 400 mètres, il contraste avec la plaine d'Angkor par sa couverture végétale dense et ses escarpements de grès. À la source des rivières de la région, ce massif est considéré comme la réserve d'eau d'Angkor. Il comporte nombre de vestiges archéologiques : temples, structures hydrauliques et abris rupestres qui en font l'un des sites majeurs de l'archéologie cambodgienne, dont le caractère sacré perdure.

Selon les sources épigraphiques, le roi Jayavarman II aurait établi sa résidence et sa capitale Mahendraparvata sur ce plateau à son arrivée à Angkor, à la fin du VIII^e siècle. Toutefois, peu d'études avaient confronté ces sources aux données

du terrain. Depuis 2008, la Fondation *Archaeology & Development* comble cette lacune en combinant cartographie du massif, fouilles archéologiques et étude par LiDAR.

Le vaste réseau urbain révélé suggère l'existence d'une capitale, remontant probablement au début de la période angkoriennne. Des chaussées imposantes, orientées selon les points cardinaux, s'étendaient sur plusieurs kilomètres. Elles reliaient les sites sacrés – tant des temples inventoriés il y a plusieurs décennies que des structures jusqu'alors inconnues. Un réseau hydraulique complexe constitué de digues, barrages, canaux et bassins complète ce schéma.

Les opérations archéologiques ont mis au jour les vestiges d'une occupation longue et variée du plateau. Une urbanisation importante couplée à un ensemble de monuments s'y est implantée au début

de la période dite angkoriennne. Ces temples présentent des caractéristiques architecturales et décoratives qui s'épanouiront plus tard. Certains d'entre eux ont toutefois pu précéder ce système urbain.

Après l'abandon du Phnom Kulen en tant que siège de la royauté, probablement au IX^e siècle, le Phnom reste occupé. Les caractéristiques géographiques du massif, avec ses falaises et ses rochers, constituent des abris idéaux pour le développement des ermitages. À la période postangkoriennne, le massif attire des pèlerins qui viennent y consacrer des statues de Bouddha. Cette renommée est encore d'actualité, car le Phnom constitue l'une des montagnes les plus sacrées du Cambodge.

Les recherches en cours relient ces vestiges à l'histoire khmère. Ce programme illustre la nécessité de croiser les sources archéologiques aux données épigraphiques.



Sondage sur le site de Phnom Kulen, mettant au jour un canal et des trottoirs.

LES AÇRAMA, TÉMOINS DE L'ÉTENDUE DE L'EMPIRE KHMER

D'après les inscriptions, une centaine d'*âçrama* ou monastères auraient été fondés à la fin du IX^e siècle par le roi Yaçovarman I^{er}. Ces lieux d'enseignement, d'asile et de retraite spirituelle furent la première institution implantée sur l'ensemble de l'empire, constituant ainsi un instrument de centralisation du pouvoir royal. En province, ils étaient associés aux sanctuaires les plus vénérés et permettaient aux pèlerins et voyageurs de disposer de gîtes d'étapes sur lesquels était apposé le sceau royal.

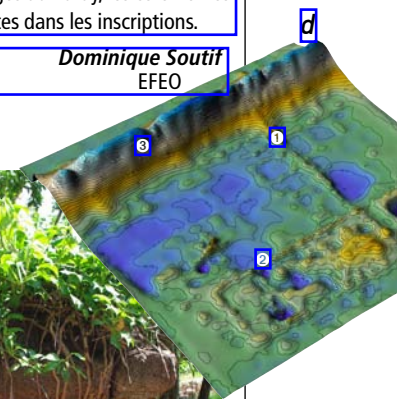
À Angkor, quatre *âçrama* étaient consacrés respectivement au vishnouisme, au bouddhisme et à deux courants çivaïtes. Ils avaient en charge la protection du Baray oriental, immense aménagement hydraulique essentiel à la vie économique et religieuse d'Angkor. Les campagnes de fouilles et de prospections géophysiques conduites dans trois de ces *âçrama* ont permis de préciser leurs caractéristiques physiques et fonctionnelles. Malgré leurs différentes obédiences, ils suivaient un même plan : une

enceinte rectangulaire orientée Est-Ouest (375×150 mètres) délimitait un espace formé de trois zones. À l'Est, un tertre accueillait les activités rituelles et comportait un bâtiment de culte en latérite long de 25 mètres et un édicule abritant une stèle qui précisait la règle du monastère. Le reste de l'*âçrama* était consacré à l'occupation domestique : l'habitat, mais aussi des activités agricoles indispensables à l'approvisionnement des religieux. Des outils et scories en fer mis au jour montrent que

ces espaces étaient aussi des lieux d'artisanat. La céramique suggère qu'ils restèrent en activité au moins jusqu'à la fin du XIII^e siècle.

Cet ensemble était complété par une digue dans l'angle Nord-Est qui reliait l'*âçrama* au Baray. Il est vraisemblable que ces voies permettaient aux religieux de célébrer, sur les berges du Baray, les cérémonies prescrites dans les inscriptions.

Dominique Soutif
EFO



LES AÇRAMA COMPORTAIENT UN BÂTIMENT LONG, tel celui de Prasat Komnap Sud, mis au jour en 2012 (a) grâce à l'analyse topographique du site (d, on distingue la digue 1 qui reliait le bâtiment 2

à celle du Baray oriental 3). Un édicule à stèle (c, *âçrama* de Prasat Ong Mong) portait la règle du monastère (b, estampage de l'inscription de l'*âçrama* de Prasat Ong Mong, de confession bouddhique).

Dans la capitale Hariharâlaya, à Roluos, bien que le souverain Jayavarman II soit supposé y avoir séjourné avant son sacre et fini ses jours, l'ensemble des monuments principaux était attribué à l'un de ses successeurs qui y a laissé ses inscriptions : le roi Indravarman I^{er}, en 877. Là encore, les datations radiométriques et l'étude de la céramique provenant des fouilles réalisées par la mission Mafkata à Roluos montrent que la création de cette capitale doit être avancée de plus d'un siècle. Si l'organisation urbaine monumentale d'Hariharâlaya date donc peut-être de l'arrivée de Jayavarman II à Angkor, cette cité existait déjà bien avant.

La principale difficulté pour reconstituer la vie à Angkor est qu'il ne reste aucune trace d'habitat en surface. Construites en matériaux périssables – bois, bambou, paille –, les habitations (même les palais royaux) ont disparu. L'utilisation de la maçonnerie, de la pierre et de la brique

était réservée à l'architecture religieuse. Néanmoins, bassins, digues, canaux et tertres sont encore perceptibles dans le relief. L'analyse topographique du terrain est donc une clé importante. La photographie aérienne, puis la télédétection et récemment le LiDAR ont permis de déceler, malgré la forêt, les cultures et les habitations villageoises actuelles, les fondations d'un vaste complexe urbain géométrisé.

Un urbanisme ouvert

Dans les années 1990, la cartographie précise du site avait mis en évidence de nombreuses zones résidentielles, des tracés agraires et de grandes infrastructures hydrauliques, et ce jusqu'à des distances assez éloignées des temples principaux. Les dernières études topographiques ont précisé cette organisation : toute la région était urbanisée en une succession de tertres habités, souvent associés à des temples locaux, des bassins

domestiques et des rizières irriguées. Parsemés entre les grands monuments, ces éléments, regroupés en villages, prenaient place au sein d'un vaste réseau territorial reliant les temples principaux et les ouvrages hydrauliques par des routes et des canaux (voir la figure 2). L'étude par LiDAR de la région dans les hauteurs des monts Kulen a notamment révélé un système urbain insoupçonné et de grande ampleur reliant les sites archéologiques connus, notamment les temples et les digues-barrages (voir l'encadré page 25).

Les études archéologiques sur le terrain ont conforté ces résultats et permettent d'entrevoir la vie sous l'Empire khmer – une vie marquée dès le IX^e siècle par la centralisation des pouvoirs royal et religieux. Les fouilles aux abords des temples pyramidaux ont ainsi montré une géométrisation des aménagements tout autour de ces édifices : ces lieux étaient d'emblée conçus dans leur ensemble, parfois avec

plusieurs enceintes couvrant des dizaines d'hectares. C'est le cas de Bakong, dans la région de Roluos au cœur de la capitale Hariharâlaya. Cet imposant temple pyramidal parementé de grès est entouré d'une série d'enceintes et de douves concentriques carrées sur plus de 100 hectares et comporte une vingtaine de sanctuaires satellites régulièrement disposés. La pyramide constituait le centre d'un ensemble architectural monumental planifié dont la construction synchrone a été révélée par les fouilles. Les travaux engagés en marge de l'édification du temple semblent avoir été d'une ampleur exceptionnelle pour l'époque, comme en témoigne le volume des remblais mis en œuvre.

Les fouilles ont aussi montré que le Bakong aurait été fondé dès la fin du VIII^e siècle, soit un siècle avant le règne d'Indravarman I^{er}, que l'on considérait comme son fondateur d'après une inscription qu'il y a laissée, alors qu'il ne fut que le commanditaire d'importantes rénovations. Des constructions et les traces d'occupation montrent que le temple central de Bakong était encore actif au moins jusqu'au XII^e siècle, mais que l'espace réservé aux cultes s'est drastiquement réduit à la fin du IX^e siècle, après l'abandon de Hariharâlaya comme capitale par le roi Yaçovarman I^{er} au profit de l'actuel centre d'Angkor. Autour du temple, les installations domestiques sont peu denses, ce qui suggère que le Bakong formait un ensemble religieux habité par quelques prêtres et des officiants, mais certainement pas une cité urbaine densément occupée comme le laisseraient penser ses vastes enceintes.

La vie religieuse ne se limite pas à ces temples. Découvertes depuis la fin du XIX^e siècle, 21 inscriptions réparties dans tout l'Empire khmer angkorien attestent la fondation, par le roi Yaçovarman I^{er}, d'un grand nombre d'*âçrama* dès les premières années de son règne, à la fin du IX^e siècle. À la fois gîtes d'étape et lieux de retraite spirituelle, ces monastères étaient dédiés à la transmission du savoir, ainsi qu'à l'accueil des voyageurs et des religieux. Ils constituent la première institution royale à avoir été généralisée à tout l'Empire khmer et représentent donc l'un des premiers témoignages de la centralisation du pouvoir royal. La mission Yaçodharâçrama, qui confronte ces données épigraphiques et les données archéologiques collectées sur le terrain, dessine peu à peu une carte de

ces lieux, qui révèle à la fois l'étendue de l'Empire khmer et les liens étroits entre les différentes confessions indiennes implantées au Cambodge à la fin du IX^e siècle (voir l'encadré page ci-contre).

À la recherche du palais de Hariharâlaya

Le pouvoir royal est établi dans la capitale du moment, où est construit le palais royal. À Hariharâlaya, en l'absence de vestiges en surface, on a longtemps ignoré où le palais avait été installé, ce qui empêchait de comprendre l'organisation urbaine de la cité. Cependant, à quelques centaines de mètres au Sud du Bakong, le site de Prei Monti constituait une piste séduisante, avec sa douve délimitant un quadrilatère de 800 mètres par 530 mètres sans lien apparent avec un petit temple inachevé situé de façon peu orthodoxe dans cette enceinte. Plusieurs campagnes de fouilles ont permis de confirmer qu'un palais a bien été construit à Prei Monti, grâce notamment à la nature des vestiges architecturaux et aux artefacts particuliers et luxueux découverts.

Les sondages ont révélé un ensemble de remblaiements et de fondations, des restes de drains maçonnés et des zones correspondant à des édifices non religieux couverts de tuiles en terre cuite, tous orientés selon les points cardinaux. Ils suggèrent une occupation du lieu avec une organisation de cours et de galeries. La haute qualité d'exécution des fondations en maçonnerie est comparable à celle des meilleurs temples. Et les sections des pièces de bois de deux

grands bâtiments, découvertes au fond des tranchées de fondation, contrastent avec les vestiges plus modestes des habitats domestiques. Enfin, les artefacts collectés sur le site – principalement en céramique, en verre ou en métal – constituent un assemblage remarquable. Ils comportent une quantité importante – exceptionnelle à Angkor à cette époque – de céramiques variées et de qualité provenant de Chine, datant de la dynastie des Tang (618-907), et de jarres turquoises du Moyen-Orient.

Cette concentration de structures en bois non religieuses et d'artefacts luxueux venus de l'étranger suggère que le site de Prei Monti correspond bien au palais royal de Hariharâlaya au IX^e siècle. La richesse du matériel retrouvé à Prei Monti, les premières céramiques importées à Angkor, invitent aussi à repenser le statut d'Angkor, longtemps considérée comme une capitale agraire isolée dans l'arrière-pays. Bien que placée au centre de l'Empire angkorien, la cité était connectée au réseau maritime de l'époque entre la Chine et le Moyen-Orient, et assez puissante pour importer des produits qui se sont généralisés au cours des siècles suivants.

La vie des Khmers s'organisait quant à elle sous la forme de petites agglomérations assez rapprochées, centrées sur de petits temples et bordées de rizières. Autour des éléments principaux de la ville de Roluos – la pyramide du Bakong et le palais de Prei Monti –, la carte archéologique révèle une concentration de nombreux petits temples avec bassins et terre-pleins indépendants, l'ensemble suggérant des groupes d'habitations.



3. AUTOUR DE PETITS TEMPLES se regroupaient des habitations bordées de rizières, de bassins et de canaux, comme ici sur une modélisation de Prasat Hê Phka, un site au Sud d'Angkor.

BIBLIOGRAPHIE

J.-B. Chevance *et al.*, *The sources of the Khmer Empire*, dans M. J. Klokke and V. Degroot (éd.), *Unearthing Southeast Asia's Past*, NUS Press, Vol. 1, p. 257-274, 2013.

D. Evans *et al.*, *Uncovering archaeological landscapes at Angkor using LiDAR*, *PNAS*, vol. 110, pp. 12595-12600, 2013.

P. Bâty et A. Bolle, *Sanctuaires et habitats sous l'aéroport de Siem Reap, Cambodge*, *Archeologia*, vol. 427, pp. 18-23, 2005.

À VISITER

Angkor : Naissance d'un mythe – Louis Delaporte et le Cambodge, exposition au musée Guimet, à Paris, jusqu'au 13 janvier 2014. www.guimet.fr

La mission Markata a sondé un de ces sites entre 2004 et 2005, le temple de Trapeang Phong. Les fouilles des terre-pleins, principalement implantés « derrière » et à l'Ouest du temple, ont confirmé la présence de successions d'habitats. On suit d'ailleurs le développement et la densification du site, du VII^e siècle jusqu'aux XI^e-XII^e siècles, avec de nouveaux tertres et le rehaussement des tertres existants. Malgré un profond remodelage du site au XI^e siècle, avec le creusement de deux bassins, les terre-pleins demeurent le lieu privilégié de vie, certains perdurant jusqu'au XIV^e siècle.

Des villages autour de sanctuaires

Sur une échelle plus grande, les fouilles préventives de l'aéroport de Siem Reap, lancées en 2004 avant son agrandissement, permettent de préciser la vie dans de telles agglomérations situées en zone périurbaine dans la plaine d'Angkor. L'aéroport a été construit au Sud du Baray occidental et à cinq kilomètres à l'Ouest d'Angkor Vat. Les fouilles ont permis d'aborder une quin-

zaine d'habitats sur terre – des *tuol* – dont l'occupation s'étend de la seconde moitié du IX^e siècle jusqu'à la fin du XIV^e siècle, soit presque toute la durée de la période angkorienne. Comme à Trapeang Phong, ces habitats sont groupés autour de sanctuaires et s'insèrent dans un ancien terrain rizicole vraisemblablement constitué d'entités cohérentes de grandes dimensions qu'il est tentant d'interpréter comme des domaines fonciers.

Trois zones d'habitat ont été fouillées de façon exhaustive sur une surface de près de quatre hectares : un tertre associé au temple de Trapeang Thlok, un tertre à Trapeang Ropou et l'ensemble de maisons du site de Tuol Ta Lo (voir la figure 2). Ces sites présentent tous des caractéristiques comparables que l'on retrouve à des degrés divers dans l'habitat rural contemporain : maintien de la maison hors d'eau par un tertre, utilisation du bois, de couvertures en tuiles ou en matière végétale, ossature de la maison installée sur des poteaux plantés ou posés, etc. Ils sont tous associés à des sanctuaires d'importance variable. Ainsi, à Trapeang Ropou, les 12 tertres

UNE MAISON KHMÈRE DU XII^e SIÈCLE

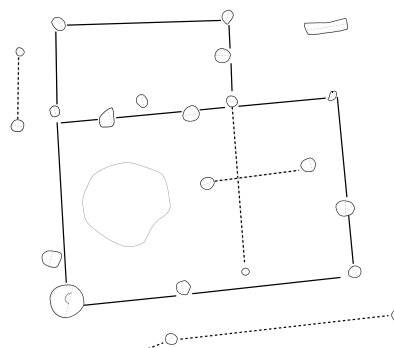
A Tuol Ta Lo, l'un des sites étudiés dans le cadre des fouilles préventives de l'aéroport de Siem Reap, deux plans complets de maisons ont pu être reconstitués. Voici la description de l'une d'elles.

Il s'agit d'une maison rectangulaire construite sur deux travées de poteaux, mesurant 8,20 mètres sur 5,10 mètres, soit une surface au sol de 41,80 mètres carrés. Elle est orien-

tée Est-Ouest et complétée au Nord par un appentis de 5 mètres sur 2,60 mètres, d'une surface de 13 mètres carrés, ce qui porte la surface totale à 54,80 mètres carrés. Les trous de poteaux, de faible diamètre, suggèrent une architecture légère. Comme aucun fragment de tuile n'y a été découvert, on pense que l'étanchéité de l'habitation était assurée par une couverture végétale.

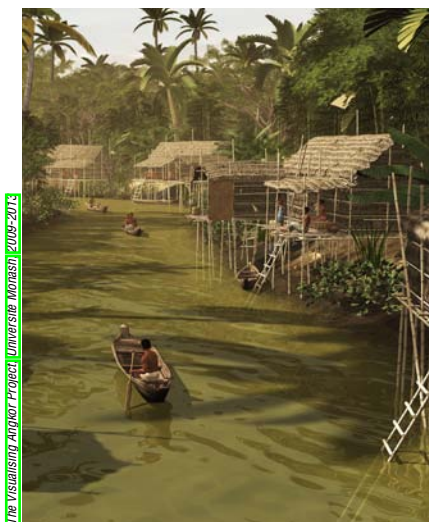
L'aspect du sol sous la maison suggère la présence de phosphate peut-être lié à la stabulation de bétail. Au Sud, le bâtiment est bordé par une clôture. Aucune trace de foyer n'a été repérée au sol sous la maison (l'utilisation régulière d'un foyer teinte le sol d'une coloration rouge), ce qui suggère l'emploi d'une plaque de foyer en argile à l'étage. L'extension du bâtiment au Nord pourrait

correspondre à l'emplacement d'une cuisine surbaissée, comme c'est encore la règle aujourd'hui dans la maison rurale traditionnelle. Ce bâtiment est localisé en bordure d'un bassin à l'Est qui a piégé du mobilier archéologique caractéristique d'une occupation domestique : marmites, réchauds, jarres, bouteilles, bols, meules en grès... Tout ce matériel est typique des XII^e-XIII^e siècles.



VUE GÉNÉRALE et plan hypothétique du bâtiment sur poteaux en cours de fouille. Le plan de la maison apparaît en négatif après le dégagement de l'empreinte des poteaux.

VUE GÉNÉRALE : S. B. / INRAP 2012



4. LES HABITATIONS, surélevées à cause des moussons, étaient constituées de bois et de couvertures en matière végétale, parfois en tuiles. Les villages étaient reliés par un réseau de routes et de canaux.

localisés sont en lien direct avec l'important sanctuaire du même nom. Ils forment un village dont le temple représente le point focal.

Les tertres sont des plates-formes quadrangulaires, orientées plus ou moins cardinalement et ajoutées au fil du temps à l'organisation d'origine centrée sur le temple. Ils ont une superficie qui varie de 1 200 mètres carrés à près de 2 000 mètres carrés, avoisinant en moyenne 1 500 mètres carrés. Le volume des bassins qui leur sont associés équivaut en général à celui de leur remblai. Ces plates-formes sont associées à des fossés drainants parfois connectés aux bassins. L'ensemble était conçu pour protéger les habitations durant les moussons.

La pérennité de ces villages est variable : le site de Trapeang Thlok a été occupé moins d'un siècle, entre la fin du X^e siècle et la première moitié du XI^e. L'agglomération de Trapeang Ropou a été habitée du X^e siècle au XIV^e siècle, et Tuol Ta Lo, entre le XII^e et le XIV^e siècles. Dans la plupart des cas, ces *tuol* ont été installés sur des terrains vierges d'occupation.

L'organisation de la surface des plates-formes est assez sommaire. On distingue en général sur le point haut du tertre un bâtiment privilégié – une maison – et parfois des bâtiments plus réduits en périphérie, dont la fonction n'est pas certaine (*voir l'encadré page ci-contre*). Les surfaces des bâtiments mesurées varient de 40 mètres carrés à plus de 50 mètres carrés. À Trapeang Thlok comme à Trapeang Ropou, la présence de tuiles suggère un système de couvertures soigné et une qualité

architecturale certaine. C'est en général la répartition du mobilier archéologique qui permet de déterminer l'emplacement et la fonction du bâtiment.

Des maisons avec cour vivrière

Tous les cas étudiés sont localisés sur des tertres fermés par des clôtures en bois formées d'alignements de piquets ou de poteaux. Ces clôtures déterminent une cour qui pourrait s'apparenter à une cour-verger plantée d'arbres fruitiers et complétée d'un potager, comme on en observe encore aujourd'hui dans les habitats traditionnels paysans. Les plantes cultivées dans ces vergers sont variées : bananiers, manguiers, sapotilliers, papayers, jacquiers, goyaviers, cocotiers, aréquiers, citronniers, pamplemoussiers, selon l'étude du géographe Jean Delvert (*Le paysan cambodgien*, 1961). Certaines des nombreuses fosses présentes à la surface des tertres pourraient être des chablis (trous de plantation).

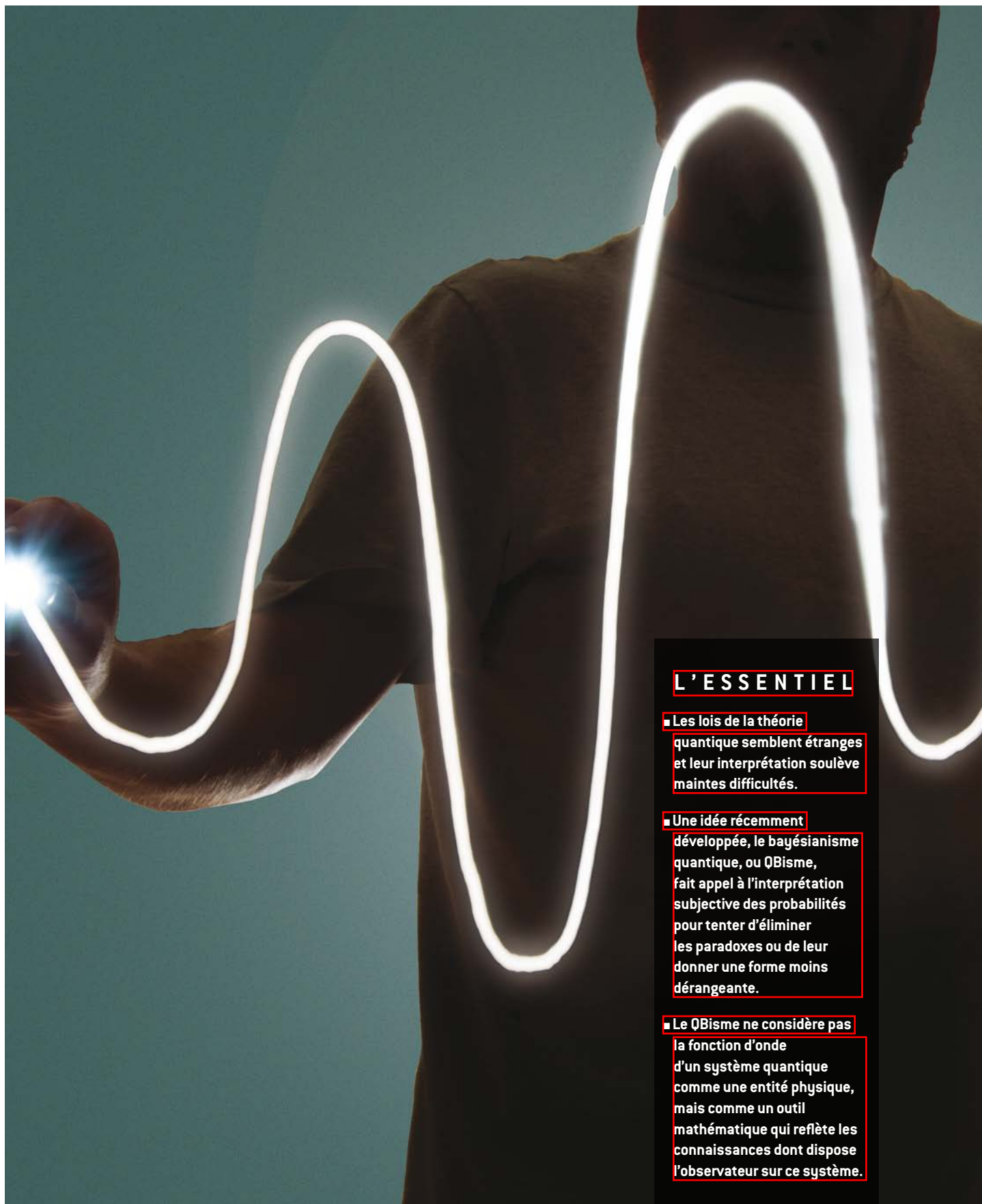
Cette cour correspondrait à une unité familiale de production vivrière et à un espace social ouvert. On y produit et on y stocke des vivres, sans doute dans des greniers à paddy (le riz avec son enveloppe) et des jarres. Plusieurs types d'activités rurales ou domestiques apparaissent dans cet espace, identifiées par l'étude du mobilier : l'élevage, la boucherie (découpe de viande), la mouture et le broyage des graines (meules et broyeurs), la pêche (poids de filets), le tissage ou le filage, repérés

par la présence de pesons, des poids qui servaient à tendre les fils, et de fusaïoles, collerettes qui, installées à la base des fuseaux, les stabilisaient.

Le vaisselier découvert renseigne sur l'équipement de la maison, mais aussi sur les échanges économiques avec des régions proches (des céramiques proviennent des Kulen) ou des centres de production lointains tels que la Chine ou la région de Buriram, dans le territoire actuel de la Thaïlande. En revanche, aucune trace d'activité artisanale en rapport avec les arts du feu, telles la métallurgie ou la céramique, n'a été repérée pour l'instant. De façon générale, les objets manufacturés semblent avoir été produits sur des sites spécialisés.

Cet espace vivrier formé par la maison angkorienne sur tertre et sa cour est sans doute l'élément le plus important pour qualifier ce type d'habitat d'unité de production et de consommation. L'environnement de la maison rurale ou périurbaine traduit une économie de subsistance, complétant une économie plus globale fondée sur la culture du riz. L'importance de cette production vivrière, quelle que soit la part réservée à l'autoconsommation ou celle réservée à l'échange, est une caractéristique des sociétés préindustrielles.

En marge des grands temples angkorien qui concentrent l'attention des conservateurs et de l'industrie du tourisme, la cité d'Angkor reprend progressivement sa place au fil des recherches archéologiques : au cœur d'une civilisation dont les monuments religieux ne sont qu'une des composantes. ■



L'ESSENTIEL

■ **Les lois de la théorie** quantique semblent étranges et leur interprétation soulève maintes difficultés.

■ **Une idée récemment** développée, le bayésianisme quantique, ou QBisme, fait appel à l'interprétation subjective des probabilités pour tenter d'éliminer les paradoxes ou de leur donner une forme moins dérangeante.

■ **Le QBisme ne considère pas** la fonction d'onde d'un système quantique comme une entité physique, mais comme un outil mathématique qui reflète les connaissances dont dispose l'observateur sur ce système.



L'étrangeté quantique, juste une impression ?

Hans Christian von Baeyer

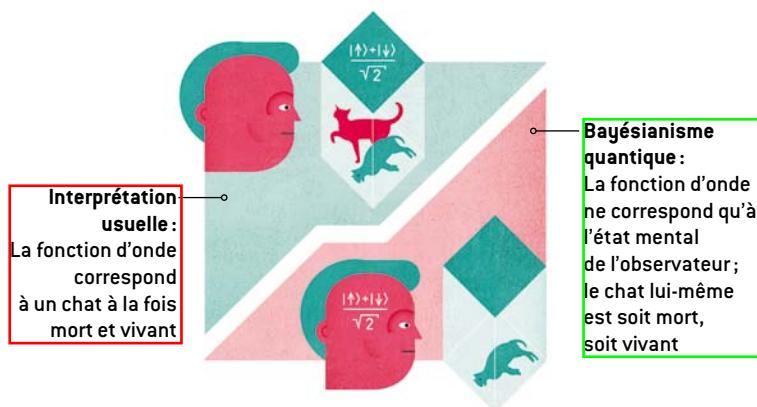
Certains physiciens cherchent à réinterpréter la théorie quantique en considérant les probabilités comme une notion subjective. Selon ce « bayésianisme quantique », ou « QBisme », l'étrangeté du monde microscopique ne serait alors qu'apparente.

La physique quantique rend compte sans faillir du comportement de la matière à toutes les échelles, du niveau subatomique jusqu'aux immensités astronomiques. C'est la théorie la plus féconde de toutes les sciences physiques. C'est aussi la plus étrange.

Dans le monde quantique, les particules semblent se trouver en plusieurs endroits à la fois, l'information semble voyager plus vite que la lumière, et les chats semblent être à la fois morts et vivants. Cela fait neuf décennies que les physiciens sont aux prises avec les paradoxes apparents du monde quantique. Contrairement à la théorie de l'évolution ou à la mécanique céleste, dont les enseignements font partie intégrante du paysage intellectuel général, la théorie quantique est encore considérée (même par de nombreux physiciens) comme une anomalie bizarre, un puissant livre de recettes très utiles, mais quelque peu énigmatiques. La confusion qui règne autour de l'interprétation de la théorie quantique continuera à entretenir la perception selon laquelle ce qu'elle indique sur notre monde est sans rapport avec notre vie quotidienne et trop bizarre pour nous concerner.

LE REMÈDE À UNE ABSURDITÉ QUANTIQUE

Pour illustrer la différence entre le bayésianisme quantique et l'interprétation orthodoxe de la théorie quantique, prenons l'exemple du chat de Schrödinger. Dans la version usuelle, un chat et une fiole de poison sont enfermés dans une boîte hermétique. Un événement quantique qui se produit avec une probabilité de 50 pour cent brise (ou ne brise pas) la fiole, et tue (ou ne tue pas) le chat. Avant qu'un observateur ne regarde à l'intérieur de la boîte, la fonction d'onde décrivant le système est une superposition des états *vivant* et *mort*, comme devrait l'être le chat lui-même. L'acte d'observation projette le chat dans l'un ou l'autre état. En revanche, dans le QBisme, la fonction d'onde est simplement une description de l'état mental de l'observateur. La superposition s'applique à cet état et à rien d'autre. Le chat est soit mort, soit vivant ; l'observation révèle dans quel cas il se trouve.



En 2001, quelques physiciens ont commencé à développer un modèle qui élimine les paradoxes quantiques ou, du moins, les présente sous une forme moins troublante. Le modèle, nommé bayésianisme quantique, ou QBisme en abrégé, réinterprète l'entité qui se trouve au cœur de l'étrangeté quantique : la fonction d'onde.

Dans la vision usuelle de la théorie quantique, un objet tel qu'un électron est représenté par sa « fonction d'onde », une fonction $\psi(x, t)$ qui assigne à chaque instant t une valeur à tout point x de l'espace et qui décrit les propriétés de l'objet. Pour prédire le comportement de l'électron, il faut calculer l'évolution de sa fonction d'onde au cours du temps. Le résultat du calcul fournira la probabilité que l'électron ait une certaine propriété (par exemple celle de se trouver à tel ou tel endroit). Mais des problèmes surgissent lorsqu'on suppose que la fonction d'onde a une réalité.

Le QBisme, qui combine la théorie quantique avec une interprétation particulière des probabilités, affirme que la fonction d'onde n'a pas de réalité objective. En fait, pour le QBisme, la fonction d'onde est une sorte de manuel de l'utilisateur, un outil mathématique dont se sert l'observa-

teur pour prendre des décisions éclairées concernant le monde qui l'entoure. Plus précisément, selon cette interprétation, l'observateur utilise la fonction d'onde pour traduire sa conviction personnelle qu'un système quantique possède telle ou telle propriété, sachant que les choix et actions propres de l'individu modifient le système d'une manière par nature incertaine.

La fonction d'onde, une abstraction

Un autre observateur, utilisant une fonction d'onde qui décrit le monde tel que cette personne le voit, peut parvenir à une conclusion totalement différente sur le même système quantique. À un système donné (un événement donné) peuvent ainsi correspondre autant de fonctions d'onde différentes qu'il y a d'observateurs. C'est lorsque les observateurs ont communiqué entre eux et modifié leurs fonctions d'onde personnelles pour rendre compte des connaissances nouvellement acquises qu'une vision du monde cohérente émerge.

Vue ainsi, la fonction d'onde « pourrait bien être l'abstraction la plus puissante que l'on ait jamais trouvée », selon David Mermin,

un physicien théoricien de l'Université Cornell récemment converti au QBisme.

L'idée selon laquelle la fonction d'onde ne serait pas une entité réelle remonte aux années 1930 et aux écrits de Niels Bohr, l'un des fondateurs de la mécanique quantique. Ce physicien danois considérait qu'elle faisait partie du formalisme « purement symbolique » de la théorie quantique : un outil de calcul, et rien de plus. Le QBisme est le premier modèle à donner un ancrage mathématique à l'affirmation de Bohr. Il fusionne la théorie quantique avec les statistiques bayésiennes, un domaine vieux de 200 ans qui considère la probabilité comme le reflet d'une croyance subjective.

Les statistiques bayésiennes fournissent également des règles mathématiques formelles sur la façon de mettre à jour ses croyances subjectives à la lumière d'informations nouvelles. En interprétant la fonction d'onde comme une croyance subjective, sujette à être révisée par les règles de la statistique bayésienne, on fait disparaître les mystérieux paradoxes de la physique quantique, affirment les partisans du QBisme.

Considérons à nouveau l'électron. Quand nous détectons un électron, nous le trouvons en un endroit particulier. Mais quand nous ne regardons pas, la fonction d'onde de l'électron peut s'étaler, ce qui représente la possibilité que l'électron soit en de nombreux endroits à la fois. À ce stade, effectuons à nouveau une mesure. On trouvera encore l'électron en un endroit particulier. Selon le discours usuel, l'acte d'observation réduit instantanément la fonction d'onde à une fonction d'onde correspondant à une seule valeur, particulière, de la position.

Comme cette réduction semble se produire partout exactement au même moment, on a une violation apparente du principe de localité (l'idée que tout changement d'un objet doit être provoqué par un autre objet de son voisinage immédiat). Cela conduit à son tour à une des énigmes qu'Albert Einstein qualifiait d'« action fantomatique à distance ».

Depuis la naissance de la théorie quantique, les physiciens ont vu la réduction de la fonction d'onde comme une caractéristique paradoxale et troublante de la théorie. Cela a poussé les physiciens à développer des versions alternatives de la mécanique quantique, avec un succès mitigé (voir l'encadré page 34).

Pour le QBisme, en revanche, il n'y a pas de paradoxe. L'effondrement de la fonction d'onde signifie juste qu'un observateur a subitement et de manière discontinue révisé les probabilités qu'il attribue au système, sur la base de nouvelles informations, de la même façon qu'un médecin modifierait le pronostic d'un malade sur la base d'une nouvelle analyse de sang. Le système quantique n'a pas subi de changement étrange et inexplicable; le changement est dans la fonction d'onde, choisie par l'observateur pour traduire ses attentes.

On peut appliquer cette façon de penser au célèbre paradoxe du chat de Schrödinger. Le physicien autrichien Erwin Schrödinger avait imaginé une enceinte close contenant un chat vivant, une fiole de poison et un atome radioactif ayant une chance sur deux de se désintégrer dans l'heure qui suit, d'après les lois quantiques. Si l'atome se désintègre, un marteau brise la fiole et libère le poison, qui tue le chat. S'il ne se désintègre pas, le chat survit.

Neutraliser les paradoxes

Faisons l'expérience, mais sans regarder à l'intérieur de l'enceinte. Au bout d'une heure, la théorie quantique usuelle stipule que la fonction d'onde de l'atome est une superposition de deux états : l'état désintégré et l'état non désintégré. Mais comme nous n'avons pas regardé à l'intérieur de la boîte, la superposition va plus loin. Le marteau est également dans une superposition d'états, tout comme la fiole de poison. Et, ce qui est plus grotesque, le formalisme usuel de la mécanique quantique implique que le chat aussi soit dans une superposition d'états : il est simultanément mort et vivant, ce qui nous paraît absurde.

En considérant la fonction d'onde comme une propriété subjective de l'observateur, et non comme une propriété objective du chat dans l'enceinte, le QBisme résout le paradoxe. La théorie affirme que, bien sûr, le chat est soit mort, soit vivant, et pas les deux à la fois. Certes, sa fonction d'onde représente une superposition de *vivant* et *mort*, mais une fonction d'onde n'est qu'une description de ce que pense l'observateur.

L'espoir est qu'en éliminant les paradoxes, le QBisme aidera les physiciens à

mieux cerner les véritables caractéristiques fondamentales de la théorie quantique – et les « empêchera de perdre leur temps à se poser des questions stupides sur des énigmes imaginaires », comme le dit D. Mermin.

Le QBisme est né dans un court article publié en janvier 2002 sous le titre « Les probabilités quantiques en tant que probabilités bayésiennes ». Ce texte était signé de Carlton Caves, de l'Université du Nouveau-Mexique, Christopher Fuchs, alors aux Laboratoires Bell dans le New Jersey, et Ruediger Schack, de l'Université de Londres. Tous trois sont des théoriciens de l'information quantique, et leurs affiliations respectives à un département de physique, un laboratoire industriel et un département de mathématiques illustrent la nature interdisciplinaire de leurs réflexions.

Au cours de la décennie écoulée depuis, Ch. Fuchs a rejoint le *Perimeter Institute*,

En considérant la fonction d'onde du chat comme une propriété subjective de l'observateur, et non comme une propriété objective de l'animal, le QBisme résoudrait le paradoxe du chat de Schrödinger.

dans l'Ontario (Canada), et endossé le rôle de principal porte-parole du QBisme. Ce Texan trapu, au tempérament enjoué et aux manières cordiales, a un sens de l'humour irrévérencieux et irréprensible. Ses collègues ne sont pas étonnés quand il commence un article par « Dans cet article, je vais tenter de jeter un trouble de bon aloi ».

La conviction de Ch. Fuchs semble être que la science est essentiellement une activité de communication et qu'une compréhension profonde d'un problème ne s'obtient qu'au prix d'un rude combat intellectuel. Ce physicien est à lui seul un tourbillon d'activité, transportant son ordinateur portable aux quatre coins du globe dans un vieux sac à dos, organisant des conférences, animant des débats scientifiques et donnant des cours dans les universités.

Dans cet esprit, Ch. Fuchs a créé une nouvelle forme de littérature. En 2011, l'éditeur *Cambridge University Press* a publié sa correspondance électronique avec des

scientifiques du monde entier dans un volume de 600 pages intitulé *Coming of Age with Quantum Information* (Le passage à l'information quantique). Faisant la chronique des affres de la naissance du QBisme, l'ouvrage laisse entrevoir comment la physique théorique est créée par des êtres humains bien réels. Le livre témoigne également de la conviction de Ch. Fuchs qui, contrairement à la plupart des scientifiques, estime que la philosophie est importante non seulement en raison de son influence sur la physique, mais aussi en raison des idées profondes que la physique peut lui apporter.

L'ouverture d'esprit de Ch. Fuchs aux préoccupations philosophiques devient claire quand on réfléchit à la manière dont le QBisme nous oblige à reconsidérer ce qu'on entend par une probabilité. Les probabilités, c'est comme le temps : vous savez

ce que c'est, jusqu'à ce qu'on vous demande de le définir. On comprend assez bien que la probabilité de 50 pour cent de tomber sur *face* en lançant une pièce non truquée signifie que, dans une longue série de lancers, on obtiendra *face* dans la moitié des cas. Mais comment faut-il comprendre une affirmation telle que « La probabilité qu'il pleuve ce soir est de 60 pour cent », la situation (« ce soir ») ne pouvant

être reproduite ?

Probabilités subjectives ou objectives ?

Au cours des siècles récents, deux conceptions concurrentes de la probabilité ont été développées, chacune ayant ses variantes. L'interprétation dite fréquentiste définit la probabilité d'un événement comme sa fréquence relative dans une série d'essais. Ce nombre est censé être objectif et vérifiable, ainsi que directement applicable aux expériences scientifiques. L'exemple type est le lancer d'une pièce : dans un grand nombre de lancers, environ la moitié des résultats seront des *face*, de sorte que la probabilité de tomber sur *face* est approximativement égale à $1/2$ (en considérant un nombre infini de lancers, la probabilité est exactement égale à $1/2$; mais cette notion de probabilité devient alors invérifiable et perd sa prétention à l'objectivité).

QUATRE INTERPRÉTATIONS DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Que se passe-t-il réellement dans le monde quantique ? Les scientifiques ont proposé une dizaine d'interprétations différentes de ce qui est sous-jacent au formalisme mathématique. Le bayésianisme quantique est peut-être la plus radicale d'entre elles ; les quatre alternatives suivantes sont parmi les plus répandues.



L'interprétation dite de Copenhague, surtout due au Danois Niels Bohr et à l'Allemand Werner Heisenberg, est la version orthodoxe de la théorie quantique. Les propriétés mesurables d'un système tel qu'un atome

sont déterminées par son « état quantique ». Ce dernier est décrit par une expression mathématique nommée fonction d'onde. Elle permet, à l'aide de la règle dite de Born, de calculer les probabilités des résultats d'une mesure. Lors d'une mesure, l'observateur provoque la réduction de l'état quantique en un nouvel état, qui correspond au résultat effectif de l'expérience. Cette réduction instantanée de la fonction d'onde soulève des difficultés conceptuelles, car elle suppose des effets se propageant plus vite que la lumière.



L'interprétation des univers multiples. Selon cette idée radicale, l'état quantique de l'Univers est unique, évolue régulièrement et de manière prévisible. Quand on réalise une expérience pour déterminer par laquelle

de deux fentes un électron est passé, par exemple, cet état ne se réduirait pas à l'état correspondant à une seule des fentes ; l'Univers se dédoublerait en deux branches indépendantes, correspondant aux deux résultats. Ainsi, au cours du temps, l'Univers se ramifierait indéfiniment comme un arbre où chacune des branches correspond à la réalisation d'un des résultats possibles. Mais cette théorie des « multivers » est incapable d'expliquer le processus responsable de la ramification et a du mal à justifier la règle de Born.



L'interprétation de l'onde-pilote. Plusieurs physiciens, dont Albert Einstein à un certain moment, ont privilégié une réécriture du corpus mathématique de la mécanique quantique de façon à inclure un champ

de force réel, nommé onde-pilote, qui contrôle le mouvement d'une particule. Malheureusement, cette image séduisante échoue dès que plusieurs particules (disons N particules) sont impliquées. Elles ne se déplacent pas dans notre espace familier à trois dimensions, mais dans un espace abstrait à $3N$ dimensions. Plus troublant encore, l'onde-pilote exerce une action à distance, par laquelle des effets physiques sont transmis instantanément à grande distance.



Théories de la réduction spontanée. Plutôt que d'éliminer la réduction de la fonction d'onde due à l'observateur, ces théories postulent qu'il s'agit d'un processus entièrement naturel : de tels processus

ont lieu spontanément, bien que rarement, pour chaque système quantique, mais deviennent prépondérants quand le système quantique interagit avec un objet macroscopique. Ces théories doivent cependant expliquer comment est réalisée la réduction. Des expériences de laboratoire, portant sur des systèmes constitués de quelques atomes ou photons, ont été réalisées ou sont en cours afin d'analyser les mécanismes à l'œuvre et de les élucider.

On pourrait à la rigueur appliquer cette définition à la prévision du temps, en dénombrant les configurations météorologiques réelles ou simulées. Mais l'interprétation fréquentiste est inopérante pour attribuer une probabilité au succès d'une opération commando telle que l'assassinat de Ben Laden, situation manifestement non reproductible.

Le point de vue le plus ancien sur les probabilités est l'interprétation bayésienne. Il tire son nom de Thomas Bayes, pasteur anglais du XVIII^e siècle dont les idées ont été précisées et diffusées par le physicien français Pierre-Simon Laplace.

Des degrés de croyance mis à jour

À l'inverse de la probabilité fréquentiste, la probabilité bayésienne est subjective : elle mesure le degré de croyance qu'un événement se produira. Dans les cas simples tels que les lancers de pièce, les probabilités fréquentistes et bayésiennes sont en accord. Pour les prévisions météorologiques ou portant sur l'issue d'une

action militaire, la probabilité bayésienne, contrairement à la probabilité fréquentiste, a la liberté de combiner des informations statistiques quantitatives avec des estimations intuitives fondées sur l'expérience du passé.

L'interprétation bayésienne traite facilement les cas uniques, à propos desquels l'approche fréquentiste est muette, et évite les pièges de l'infini, mais sa véritable puissance est plus spécifique. Sur la base de cette interprétation, les probabilités attribuées à tel ou tel événement sont sujettes à changement, parce que les degrés de croyance ne sont pas définitifs. Un météorologue fréquentiste n'aurait pas de mal à calculer la probabilité de pluie si la région a un climat stable, prédictible depuis de nombreuses années. Mais dans le cas d'un changement soudain, telle une sécheresse, pour lequel il y a peu de données, un prévisionniste bayésien est mieux armé pour rendre compte de l'information nouvelle et de l'état du climat.

Au cœur de la théorie se trouve une formule explicite, le théorème de Bayes, qui permet de calculer l'effet d'une information

nouvelle sur l'estimation d'une probabilité. Par exemple, quand il soupçonne un cancer chez un patient, le médecin attribue une probabilité initiale, nommé probabilité *a priori*, fondée sur des données telles que l'incidence connue de la maladie dans la population générale, les antécédents médicaux de la famille du patient et d'autres facteurs pertinents. À réception des résultats des analyses du patient, le médecin peut mettre à jour cette probabilité en utilisant le théorème de Bayes. La valeur résultante n'est ni plus ni moins que le degré personnel de croyance du médecin.

La plupart des physiciens affichent leur foi dans les probabilités fréquentistes plutôt que bayésiennes, tout simplement parce qu'on leur a appris à fuir la subjectivité. Mais quand il s'agit de faire une prédiction, l'approche bayésienne prévaut, affirme Marcus Appleby, mathématicien à l'Université de Londres, convaincu par Ch. Fuchs de l'importance des probabilités bayésiennes.

M. Appleby fait remarquer qu'il nous paraîtrait insensé de participer à une loterie si l'on a appris que c'est la même personne

qui a gagné chaque semaine depuis dix ans, même si une approche strictement fréquentiste affirmerait que les résultats des tirages précédents sont sans effet sur les résultats futurs. En pratique, personne n'ignorerait le résultat des semaines précédentes. En réalité, la stratégie de bon sens serait d'adopter le point de vue bayésien, c'est-à-dire d'actualiser nos connaissances et d'agir en tenant compte des meilleures données disponibles.

Récrire les règles quantiques

Même si le QBisme nie la réalité de la fonction d'onde, ce n'est pas une théorie nihiliste qui nie toute réalité, souligne R. Schack, l'un des trois concepteurs initiaux du QBisme. Le système quantique examiné par un observateur est en effet très réel, note-t-il. Sur le plan philosophique, dit D. Mermin, le QBisme suggère l'existence d'une séparation, d'une frontière, entre le monde où vit l'observateur et l'expérience qu'a cette personne du monde, cette expérience subjective étant décrite par une fonction d'onde.

Sur le plan mathématique, Ch. Fuchs a réalisé une découverte importante susceptible de renforcer la proposition du QBisme comme une interprétation valable de la théorie quantique et des probabilités. Ce résultat concerne la « règle de Born », formule qui indique à l'observateur comment calculer la probabilité d'un événement quantique à partir de la fonction d'onde (plus précisément, la règle de Born stipule que la probabilité que le système quantique manifeste la propriété X est égale au carré du module de l'amplitude de la composante de la fonction d'onde correspondant à X). Ch. Fuchs a démontré que l'on pouvait récrire presque entièrement la règle de Born dans le langage de la théorie des probabilités, sans se référer à une fonction d'onde. La règle de Born constituait le pont reliant les fonctions d'onde aux résultats expérimentaux ; Ch. Fuchs a désormais montré que l'on peut prédire les résultats expérimentaux en utilisant directement des probabilités, sans passer par une fonction d'onde.

Selon Ch. Fuchs, la nouvelle expression de la règle de Born est une indication supplémentaire que la fonction d'onde n'est qu'un outil permettant à l'observateur de calculer ses croyances personnelles,

L'AUTEUR



Hans Christian von BAEYER est physicien théoricien des particules et professeur

émérite au College of William and Mary, en Virginie (États-Unis).

BIBLIOGRAPHIE

N. D. Mermin, **Quantum mechanics : Fixing the shifty split**, *Physics Today*, pp. 8-10, juillet 2012. Réactions à ce commentaire : *Physics Today*, pp. 8-15, décembre 2012.

C. A. Fuchs, **Interview with a Quantum Bayesian**, 2012 (<http://arxiv.org/abs/1207.2141>).

M. F. Pusey *et al.*, **On the reality of the quantum state**, *Nature Physics*, vol. 8, pp. 475-478, 2012.

F. Laloë, **Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?**, CNRS Éditions/EDP Sciences, 2011.

C. A. Fuchs, **QBism, the perimeter of quantum bayesianism**, 2010 (<http://arxiv.org/abs/1003.5209>).

T. Martin, **La probabilité, un concept pluriel**, M. Cozic et I. Drouet, **Interpréter les probabilités**, *Pour la Science*, novembre 2009.

ou probabilités, sur le monde quantique qui l'entoure.

La simplicité de la nouvelle équation est frappante. À un petit détail près, elle ressemble à la loi des probabilités totales, qui exige que la somme des probabilités de tous les résultats possibles d'une épreuve soit égale à 1. Le détail qui change (la seule référence à la théorie quantique dans cette prescription de la façon de calculer les probabilités) est l'intervention de d , la dimension quantique du système. Ce terme de dimension ne se rapporte pas à la longueur ou à la largeur, mais au nombre d'états qu'un système quantique peut occuper. Par exemple, un électron unique, dont l'état de spin a deux orientations possibles, aurait une dimension quantique égale à 2.

Ch. Fuchs fait remarquer que la dimension quantique est un attribut intrinsèque, irréductible, qui caractérise la « nature quantique » d'un système, de la même façon que la masse d'un objet caractérise ses propriétés gravitationnelles et inertielles. Bien que d soit implicite dans tous les calculs de physique quantique, son apparition explicite et au premier plan dans une équation fondamentale est inédite. La règle de Born étant parée de ces nouveaux habits, Ch. Fuchs espère avoir découvert la clef d'une nouvelle vision de la mécanique quantique. « Je caresse l'idée, confesse-t-il, que [la règle de Born] soit le plus important de tous les axiomes de la théorie quantique. »

Une théorie encore en construction

L'un des reproches faits au QBisme est son incapacité à expliquer des phénomènes macroscopiques complexes en fonction de phénomènes microscopiques plus primitifs, comme le fait la théorie quantique habituelle. La manière la plus directe de répondre à ce défi serait que le QBisme réussisse à fonder la théorie quantique sur des hypothèses nouvelles et convaincantes.

Cet objectif affiché n'est pas encore atteint, mais le QBisme offre dès maintenant une nouvelle vision de la réalité physique. En interprétant la fonction d'onde en termes de degrés de croyance personnelle, il donne un sens mathématique précis à l'intuition de Bohr selon laquelle la physique porte sur ce que l'observateur peut dire de la nature, et pas plus. ■

Des mondes à deux

William Welsh et Laurance Doyle

Les astronomes ont découvert, grâce au télescope spatial *Kepler*, que des systèmes d'étoiles binaires abritent des planètes.

L'ESSENTIEL

■ Les étoiles binaires gravitant l'une autour de l'autre sont très répandues. De tels systèmes peuvent-ils abriter des planètes ?

■ Certains astronomes pensaient que l'environnement autour des étoiles binaires était trop chaotique pour permettre la formation de planètes.

■ Les observations du télescope spatial *Kepler* confirment que de telles planètes existent.

■ Certaines occupent la zone « habitable » de leur système, là où la présence d'eau liquide est possible.

Photo: NASA



soleils

Les couchers de soleil sur Terre sont souvent magnifiques. Alors imaginez un double coucher de soleils avec des étoiles de différentes couleurs tournant l'une autour de l'autre ! Pendant des années, nous nous sommes demandé si les paires d'étoiles, les « binaires », sont accompagnées de planètes. Se pourrait-il qu'il existe des planètes telle Tatooine, imaginée par le cinéaste George Lucas dans le film *Star Wars* où le ciel est éclairé par le rougeoiement de deux soleils ?

Certains astrophysiciens doutaient de cette possibilité. L'environnement autour d'une paire d'étoiles, expliquaient-ils, serait trop chaotique pour que des planètes se forment. Contrairement à un corps en orbite autour d'une seule étoile, une planète en orbite autour de deux étoiles serait soumise à deux champs gravitationnels. Et comme les étoiles elles-mêmes sont en orbite l'une autour de l'autre, l'intensité des forces gravitationnelles changerait en permanence. Même si une planète pouvait se former dans un tel environnement, sa stabilité à long terme ne serait pas assurée : la planète risquerait d'être éjectée hors du système stellaire ou de s'écraser sur une des étoiles. Si des observations de systèmes d'étoiles binaires montraient déjà des signes indirects de l'existence de ces planètes « circumbinaires », les preuves directes manquaient.

En 2009, la NASA a mis en orbite le télescope spatial *Kepler*, dont l'objectif est la recherche d'exoplanètes. Des milliers de « planètes candidates » ont été découvertes par la méthode des transits. Cette technique consiste à rechercher des mini-éclipses résultant du passage devant l'étoile d'une planète en orbite : la planète bloque alors une partie de la lumière émise par l'étoile, de sorte que son éclat est modifié de façon périodique. Après deux ans d'observations, aucune planète circumbinaire n'avait été détectée par le télescope. Nous commençons à croire que cette configuration était impossible.

Puis le découragement a laissé la place à l'enthousiasme avec la découverte de Kepler-16b, la première planète circumbinaire à transit. Quelques mois plus tard, nous ajoutons deux autres planètes (Kepler-34b et Kepler-35b). Tout en étant exotiques, ces systèmes ne sont pas si rares. Sept planètes circumbinaires ont été dévoilées par *Kepler*, d'autres devront être confirmées. Les calculs suggèrent

qu'il en existe vraisemblablement des dizaines de millions dans la Voie lactée.

La quête des planètes circumbinaires a commencé avant même les premières preuves de l'existence d'« exoplanètes » en dehors du Système solaire. Cependant, nous savions que les transits pour une planète circumbinaire seraient complexes à détecter. Nous nous sommes donc concentrés sur la configuration particulière des étoiles binaires à éclipses. Observées de la Terre, ces binaires à éclipses se déplacent l'une autour de l'autre dans un plan tel qu'elles passent régulièrement devant leur partenaire. Si une planète est présente dans le système, elle devrait perturber la date des éclipses des étoiles. Nous avons même commencé par étudier une configuration encore plus spécifique. Nous avons cherché des planètes situées dans le même plan que leurs étoiles, qui produiraient un transit lors du passage de la planète devant les étoiles. Nous avons envisagé ce scénario sachant qu'un système stellaire se forme à partir d'un disque aplati de gaz et de poussière. On espérait voir les étoiles et la planète évoluer dans un même plan, celui du disque.

Deux cas de figure

Un système à deux étoiles et une planète se présente sous deux configurations possibles. Si les deux étoiles d'un système binaire sont très éloignées, la période orbitale étant de quelques centaines d'années par exemple, les étoiles s'influencent peu et se comportent pratiquement comme si elles étaient isolées. Des planètes peuvent être en orbite autour d'une des deux étoiles, et seront peu influencées par la présence de l'autre. Des dizaines de ces planètes circumstellaires, dites de type S, ont été découvertes ces dix dernières années.

La configuration qui nous intéresse ici intervient quand les étoiles sont si proches qu'il ne leur faut que quelques semaines, voire quelques jours, pour parcourir leur orbite autour de l'autre astre. Une planète d'un système binaire de ce type aura une orbite stable seulement si elle est en orbite autour des deux étoiles en même temps, et non autour d'une seule. Les calculs montrent que le rayon orbital par rapport aux étoiles doit être plus grand qu'un minimum critique de l'ordre de deux à trois fois la distance qui sépare les deux étoiles. En dessous de

LES AUTEURS



William WELSH est astronome à l'Université d'État de San Diego, en Californie.



Laurance DOYLE est astrophysicien à l'Institut SETI de Mountain View, en Californie.

Les binaires à éclipses

Les systèmes d'étoiles binaires à éclipses sont situés dans un plan qui permet de voir une étoile passer devant l'autre lors de leurs révolutions.

Il est possible de modéliser l'atténuation de la lumière lors d'une éclipse pour en déduire la taille et la forme des étoiles. En couplant cela à d'autres mesures, on peut déterminer le rayon et la masse des étoiles.

Ces mesures sont utilisées comme références pour estimer la masse et le rayon d'étoiles binaires sans éclipses ou d'étoiles simples.

ce seuil, le système de binaires en rotation déstabiliserait l'orbite de la planète, qui serait avalée par l'une des étoiles ou éjectée dans la galaxie. Les planètes de ce type sont les planètes circumbinaires, dites de type P. Pour montrer que ces systèmes existent, une confirmation par l'observation était nécessaire.

Dans un système simple à une étoile et une planète, les transits se produisent avec la régularité d'un métronome, ce qui facilite leur détection. Mais dans un système à trois corps, cette régularité est perturbée. Dans le système simple, l'étoile est immobile, alors que dans le système binaire, les étoiles tournent rapidement l'une autour de l'autre. La planète est en orbite autour des deux astres à une vitesse plus faible. Dès lors, le transit s'effectue devant une double cible mouvante, de sorte que la planète passe devant une des étoiles soit en avance, soit en retard par rapport au cas où les trois corps sont alignés (*voir l'encadré pages 40-41*). Ces variations sont calculables (si l'on connaît les masses et les orbites des astres), mais les transits ne seront pas périodiques. De plus, la durée du transit change selon le mouvement relatif de la planète par rapport à l'étoile qu'elle croise ; si elles vont dans le même sens, le transit dure plus longtemps, mais quand l'étoile se déplace dans l'autre sens, le transit est plus court. Ces variations compliquent la détection des planètes circumbinaires, mais elles fournissent une signature irréfutable de la présence d'une exoplanète, car aucun autre phénomène astronomique ne présente une telle organisation spatiale et temporelle.

Première détection

Pendant quatre ans, le télescope *Kepler* a fixé une région particulière du ciel et cherché l'atténuation de la lumière caractéristique du passage d'une planète devant son étoile hôte. Les observations ont aussi permis de découvrir plus de 2000 nouveaux systèmes d'étoiles binaires à éclipses. Et plusieurs systèmes exotiques ont été observés, dont les premiers systèmes de trois étoiles à éclipses.

En 2011, l'un de nous (L. Doyle) et Robert Slawson, de l'Institut SETI, ont remarqué des éclipses anormales dans le système KIC 12644769. Les deux étoiles s'éclipsaient l'une l'autre tous les 41 jours, mais il y avait d'autres éclipses inexplicables.

Les deux premières se sont produites à 230 jours d'intervalle. La suivante a eu lieu 221 jours plus tard, soit neuf jours plus tôt que prévu. C'était exactement le type de signature attendu pour une planète circumbinaire.

Ces transits apportaient la preuve qu'un troisième corps est en orbite autour des étoiles binaires. Était-ce une étoile peu brillante ou une planète ? La légère atténuation indiquait que l'objet a un faible rayon. Cela n'excluait pas les petites étoiles, telles les naines brunes, qui ont une masse supérieure à 13 fois la masse de Jupiter. Nous devons donc mesurer sa masse pour nous assurer qu'il s'agissait bien d'une planète.

Outre l'observation des variations dans le transit de la planète, deux autres manifestations permettent d'identifier la présence d'une planète circumbinaire. Elles sont liées au temps de trajet de la lumière émise par les étoiles et à des perturbations dans les dates des éclipses des étoiles.

Reprenons un système binaire à éclipses accompagné d'une planète relativement grosse. Le centre de masse de la paire tourne autour du centre de masse du système à trois corps (voir l'encadré pages 40-41). Il en résulte que, parfois, les étoiles binaires sont un peu plus proches de la Terre ; à d'autres moments, elles sont un peu plus éloignées. Dans ce cas, la lumière stellaire met plus longtemps à nous parvenir, et les éclipses semblent légèrement retardées. Quand les étoiles sont plus proches de nous, les éclipses sont en avance. Ainsi, cet effet cyclique lié au temps de trajet de la lumière nous permet de déduire la présence d'un corps invisible et d'en estimer la masse. En outre, plus le troisième corps est massif et loin de la binaire, plus l'effet est prononcé, parce que la distance entre le centre de masse de la binaire et celui de l'ensemble augmente ; mais plus il est loin, plus le cycle est long. Dans le cas qui nous intéresse, il n'y avait pas de changement cyclique détectable pendant la mesure des éclipses sur une période d'environ 230 jours, ce qui impliquait que le corps caché était de faible masse. Mais encore ?

Le troisième corps influe aussi sur le système binaire par l'interaction gravitationnelle directe, nommé l'effet dynamique. Celui-ci l'emporte sur l'effet du temps de trajet de la lumière pour les objets proches. Le compagnon invisible modifie légère-

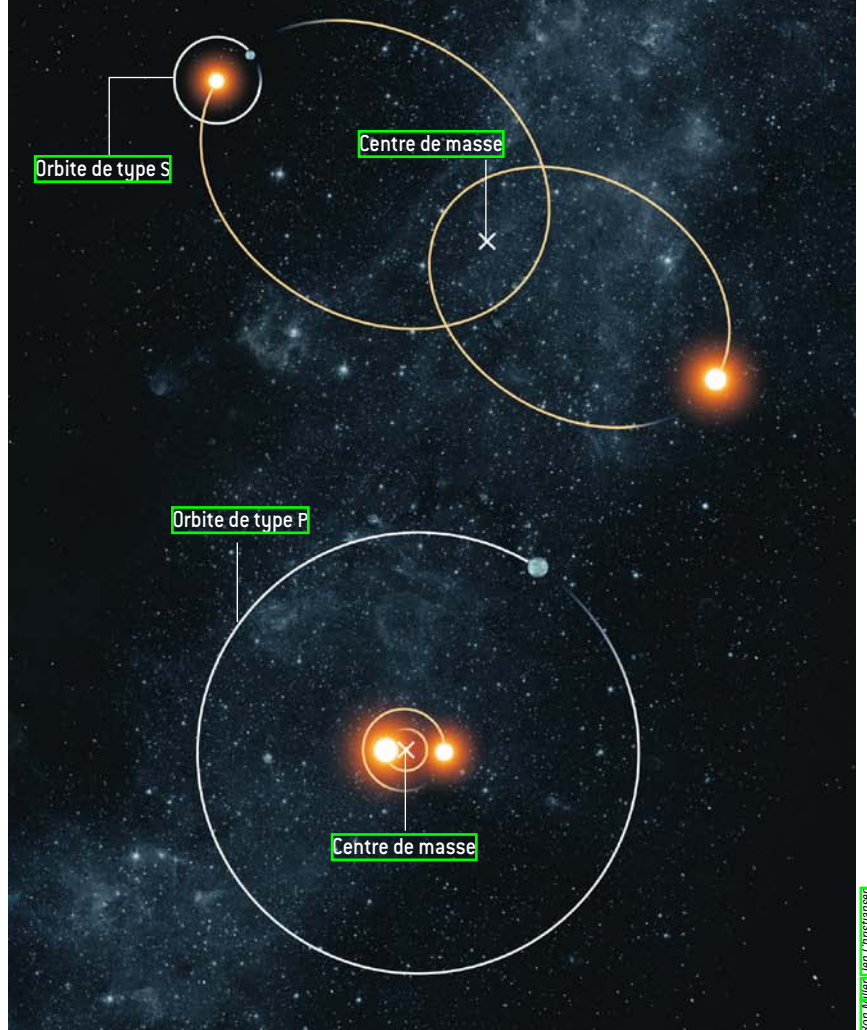
ment le mouvement des étoiles binaires et les retarde ou les fait avancer sur leur orbite. Ces perturbations changent les dates d'occurrence des éclipses. La plus petite des deux étoiles s'approchant plus du troisième corps, son orbite sera davantage perturbée.

Pour étudier un système circumbinaire, il faut prendre en compte les deux effets en même temps. Un de nos collègues de l'équipe scientifique de *Kepler*, Daniel Fabrycky, maintenant à l'Université de

Chicago, a noté qu'un objet de masse stellaire modifierait notablement les dates des éclipses, alors qu'une planète produirait une signature beaucoup plus faible, mais néanmoins mesurable. Et, pour ce système, les effets dynamiques devraient être beaucoup plus forts que l'effet du temps de trajet de la lumière. Nous avons mesuré les variations de dates des éclipses et montré que l'attraction exercée sur les étoiles correspondait à celle exercée par une planète.

EN ORBITE AUTOUR D'UNE OU DEUX ÉTOILES

Les systèmes binaires se présentent sous deux formes. Certaines étoiles binaires décrivent d'immenses orbites tournant autour de leur centre de masse commun et mettent des centaines d'années à boucler une orbite. Ces étoiles ont tendance à se comporter presque comme si elles étaient isolées ; une planète, dite de « type S », peut être en orbite autour d'une seule de ces étoiles sans être gênée par l'autre. À l'inverse, les étoiles rapprochées tournent l'une autour de l'autre en quelques semaines, voire quelques jours. Pendant des années, les astronomes se sont demandé si des planètes, dites de « type P », pouvaient survivre à un environnement gravitationnel chaotique et tourner autour de la paire d'étoiles. Aujourd'hui, on sait que oui.



Véronique Van Gansbeke

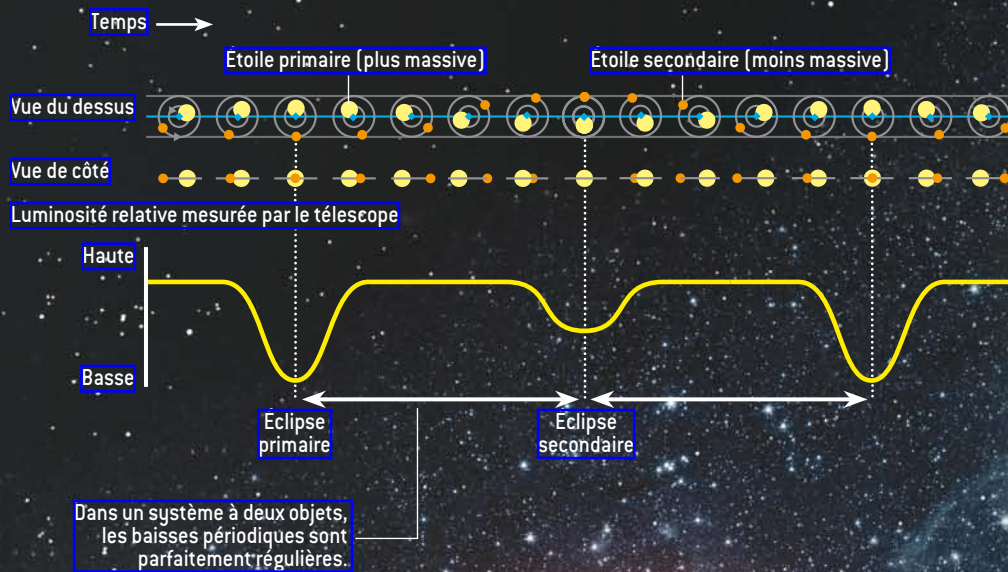
COMMENT TROUVER DES PLANÈTES AUTOUR DE SYSTÈMES À ÉTOILES MULTIPLES

Lorsque des étoiles binaires produisent des éclipses observables de la Terre, on peut en tirer d'importants renseignements sur chaque étoile en mesurant l'atténuation de la lumière. Ces éclipses servent aussi à trouver des planètes en orbite autour d'un système d'étoiles binaires. Mais il n'est pas facile de mettre en évidence ces objets, car les systèmes à trois corps ont souvent des comportements très complexes. Les illustrations qui suivent sont des versions simplifiées à l'extrême des effets que recherchent les astronomes.

(Les schémas ne sont pas à l'échelle)

A quoi ressemblent les étoiles binaires

Dans un système d'étoiles binaires à éclipses, chaque étoile bloque brièvement la lumière de l'autre, créant des baisses périodiques de la luminosité.



Les transits planétaires devant des étoiles binaires

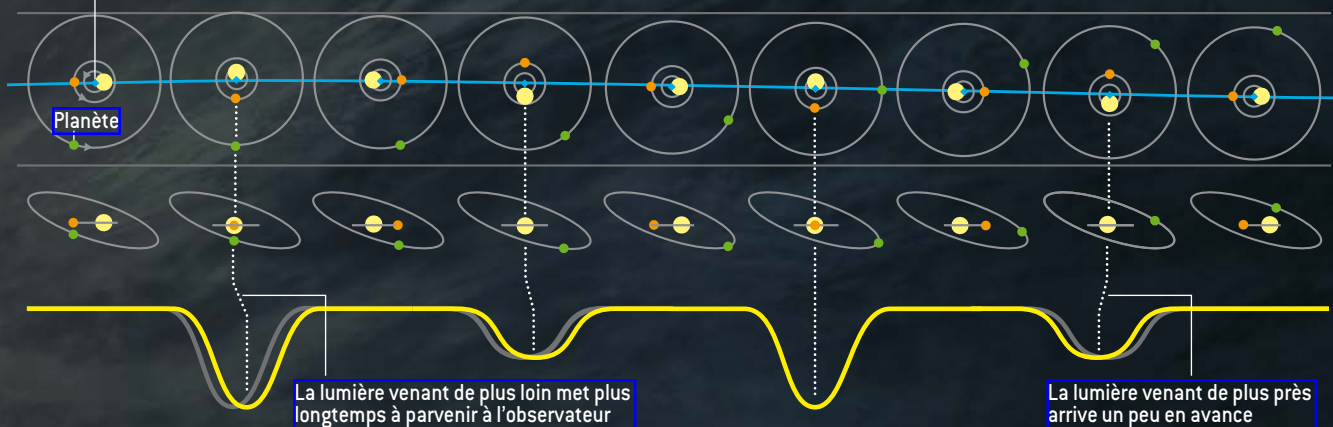
Si une planète passe devant une étoile, elle bloque une partie de la lumière de l'étoile. Dans un système circumbinaire, les deux étoiles bougent. Par conséquent, la planète passe devant l'étoile parfois un peu en avance (*a, courbe jaune*) et parfois un peu en retard (*c, courbe jaune*) par rapport au système où les trois astres sont alignés (*courbe grise*). De plus, si la planète et l'étoile vont dans la même direction, le transit est plus long (*b, pic plus large*) ; dans la direction opposée, le transit est plus court (*d, pic plus étroit*).



L'effet du temps de trajet de la lumière

Dans un système à trois corps, le centre de masse des deux étoiles binaires tourne autour du centre de masse du système. Par conséquent, par moments, les étoiles sont plus éloignées de la Terre et, à d'autres moments, plus proches de l'observateur. Un plus grand éloignement signifie que la lumière de l'éclipse binaire met plus longtemps à atteindre les télescopes, ce qui retarde légèrement l'éclipse. L'écart est de l'ordre de une seconde dans le cas de Kepler-16b.

Centre de masse des deux étoiles binaires (losange bleu)

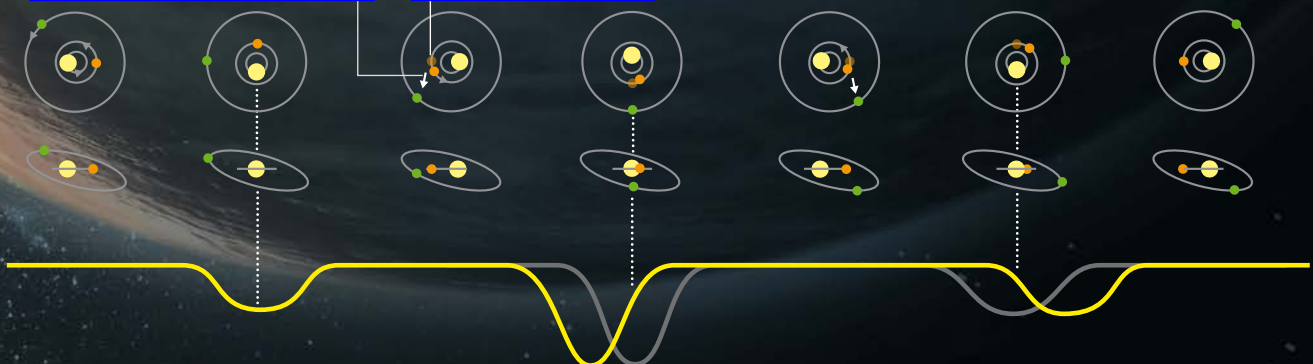


L'effet dynamique

Les planètes peuvent aussi modifier la dynamique d'un système à deux étoiles. Si la planète a un rayon orbital relativement petit, elle perturbe l'une des étoiles (ou les deux) dans sa (ou leur) révolution. De plus, si l'une des étoiles est moins massive que l'autre, son orbite s'approche davantage de la planète, amplifiant cet effet. Les passages rapprochés modifient de diverses façons les orbites à deux corps. Dans l'exemple ci-dessous, l'attraction exercée par la planète sur l'étoile secondaire la fait arriver en avance pour l'éclipse primaire et en retard pour l'éclipse secondaire. L'effet se compte en minutes ou en heures (environ une minute pour Kepler-16b).

Attraction gravitationnelle de la planète

Position attendue de l'étoile





LE SATELLITE KEPLER a découvert de nombreuses exoplanètes durant son programme prévu initialement. Ce succès a incité la NASA à prolonger la mission, mais cette extension a été écourtée par la défaillance de deux roues de réactions sur les quatre installées. Celles-ci assurent la stabilité du télescope, nécessaire pour observer des transits planétaires. Des études sont en cours pour tenter de corriger le problème. Par ailleurs, le télescope pourrait aussi servir à d'autres types d'observations astronomiques.

Cette conclusion a été confirmée par Joshua Carter, du Centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique, qui a créé un modèle numérique du système. Il a reproduit parfaitement l'ensemble des données pour une planète de masse équivalente à celle de Saturne. Cette excellente correspondance entre les observations et la modélisation prouvait l'existence de la planète et livrait des valeurs d'une grande précision pour les rayons, les masses et les caractéristiques orbitales du système.

La planète nommée Kepler-16b était donc la première planète circumbinaire à transit découverte. Depuis la surface de la planète, les étoiles binaires devraient avoir la même taille que le Soleil observé de la Terre. Kepler-16b a alors été surnommée « Tatooine », en référence à la planète fictive de *Star Wars* et à son ciel emblématique à deux soleils couchants. Cette spéculation tirée de la science-fiction était devenue un fait scientifique.

Une nouvelle classe de planètes

Kepler-16b semblait être un cas atypique. Cette planète tourne près de ses étoiles hôtes seulement neuf pour cent au-delà de l'orbite minimale de stabilité (en deçà, elle serait éjectée ou s'écraserait sur l'étoile). Et parce que Kepler-16b était la première planète circumbinaire à transit découverte, nous nous demandions si elle faisait figure d'exception.

BIBLIOGRAPHIE

W. F. Welsh *et al.*, *Transiting circumbinary planets Kepler-34b and Kepler-35b*, *Nature*, vol. 481, pp. 475-479, 2012.

J. A. Orosz *et al.*, *Kepler-47 : a transiting circumbinary multiplanet system*, *Science*, vol. 337, pp. 1511-1514, 2012.

L. R. Doyle *et al.*, *Kepler-16b : a transiting circumbinary planet*, *Science*, vol. 333, pp. 1602-1606, 2011.

En août 2012, l'un d'entre nous (W. Welsh) a remarqué des transits dans l'un des systèmes de binaires. En quelques heures, D. Fabrycky élaborait un modèle informatique qui reproduisait les périodes et durées variables des transits, confirmant que l'objet en transit était une planète. Nous avions découvert Kepler-34b. Dès le lendemain, Jerome Orosz, de l'Université d'État de San Diego, trouvait des transits dans un autre système d'étoiles binaires à éclipses qui, lui aussi, abritait une planète : Kepler-35b.

Dans les mois suivants, J. Orosz allait découvrir Kepler-38b, montrant qu'il existe aussi de petites planètes circumbinaires de la masse de Neptune, puis le système planétaire Kepler-47 comportant au moins deux planètes, ce qui montre que les étoiles binaires peuvent abriter plusieurs planètes. La dernière planète circumbinaire découverte, Kepler-64b (aussi connue sous le nom de « PH1 »), a été découverte simultanément et indépendamment par Veselin Kostov, de l'Université Johns Hopkins, et par des astronomes amateurs travaillant dans le cadre du projet *Planet Hunters* (Chasseurs de planètes). Elle fait partie d'un système stellaire quadruple, ce qui accroît la diversité des lieux où peuvent se former des planètes.

Des systèmes sans transits

Avec J. Orosz, nous avons étendu nos recherches à des planètes circumbinaires qui ne transitent pas devant leurs étoiles. En effet, la configuration à transit que nous avions cherchée jusqu'à présent nécessitait un alignement parfait. Cette contrainte était très restrictive. Nous l'avons assouplie en supposant que la planète peut s'écarter légèrement du plan des binaires de quelques degrés. Nous ne verrions plus de transits, mais ce cas devrait être beaucoup plus répandu que celui des planètes à transit. Pourrait-on les détecter grâce aux petites variations dans les périodes des éclipses des étoiles ?

Les sept planètes circumbinaires détectées jusqu'à présent nous indiquent que ces objets ne sont pas rarissimes et que nous avons mis au jour une nouvelle classe de systèmes planétaires. Pour chaque système binaire à éclipse présentant un transit de planète, cinq à dix systèmes équivalents ne présentent pas de transit, car l'alignement de la planète n'est pas parfait. Étant donné que sept planètes ont été trouvées parmi le millier de binaires à éclipses étudiées, nous

pouvons estimer que la galaxie abrite des dizaines de millions de ces systèmes planétaires circumbinaires. En outre, toutes les planètes circumbinaires découvertes à ce jour sont des géantes gazeuses. La recherche de planètes rocheuses plus petites et légères se poursuit, mais des planètes circumbinaires de la taille de la Terre sont extrêmement difficiles à détecter.

Les positions des orbites des planètes soulèvent de nombreuses questions. Elles ont tendance à être très proches des étoiles. Si elles l'étaient davantage, les orbites des planètes seraient instables. En cherchant pourquoi les planètes circumbinaires tournent si près de leur rayon critique d'instabilité, nous améliorerons les théories décrivant la formation de ces planètes et l'évolution de leur orbite dans le temps.

Même si nous ignorons pourquoi ces planètes circulent sur des orbites aussi instables, cet état de fait suggère que des planètes peuvent se former et perdurer dans un environnement chaotique.

La tendance des planètes circumbinaires de *Kepler* à se trouver près du rayon critique de stabilité a une conséquence intéressante. Pour ces étoiles, le rayon critique est souvent proche de la zone habitable, c'est-à-dire la région où l'énergie produite par les étoiles rend la température de la planète juste assez

CES PLANÈTES CIRCULENT sur des orbites instables, ce qui suggère que des planètes peuvent se former et perdurer dans un environnement chaotique.

chaude pour que de l'eau se maintienne à l'état liquide. Trop près de l'étoile, l'eau de la planète s'évapore ; trop loin, l'eau gèle. Et l'eau liquide est une condition indispensable à la vie telle que nous la connaissons.

Pour une étoile unique, la zone habitable est une région en forme de coquille sphérique autour de l'étoile. Dans un système binaire, chaque étoile a sa propre

zone habitable, et ces zones fusionnent en un sphéroïde déformé si les étoiles sont suffisamment proches. La zone habitable combinée se déplace en suivant la rotation des étoiles binaires. Ainsi, contrairement à la Terre qui décrit une orbite quasi circulaire autour du Soleil, la distance d'une planète circumbinaire à chacun de ses hôtes peut changer de façon importante au cours de l'année orbitale de la planète. Par conséquent, les saisons planétaires pourraient durer quelques semaines seulement, au gré des ballets des étoiles l'une autour de l'autre.

Deux des sept planètes circumbinaires à transits sont dans la zone habitable de leur système, une proportion très élevée. Toutefois, être dans la zone habitable ne garantit pas des conditions favorables à la vie. Par exemple, toutes les planètes découvertes sont gazeuses. Et avec des variations de saisons rapides et marquées, à quoi pourrait bien ressembler la vie dans un monde circumbinaire ? ■

COLLECTION SCIENCE LES PETITS THEMATIQUES

Des feuilleteables numériques fiables et pratiques sur l'actualité scientifique

Accédez facilement à l'essentiel sur un thème marquant de l'actualité scientifique grâce à :

- une sélection d'articles de référence parus dans *Pour la Science* et *Cerveau & Psycho*
- compilée dans un feuilleteable numérique de 35 pages environ
- téléchargeable en format PDF au prix de 3,99€ (compatible avec ordinateur et tablette).

Des dizaines de sujets à découvrir sur www.pourlascience.fr/petits-thematiques

Enterrer le carbone en déterrant du méthane ?

Du dioxyde de carbone pourrait être massivement stocké dans certains aquifères salins profonds, notamment dans le golfe du Mexique. L'exploitation du méthane contenu dans ces saumures et de leur chaleur assurerait la rentabilité de cette méthode.

Steven Bryant

Mark Twain, dit-on, observait que tout le monde se plaint du temps qu'il fait, mais que personne ne fait rien à son sujet. On pourrait transposer sa remarque au changement climatique, contre lequel les mesures sérieuses manquent. L'aspect économique l'explique en grande partie. Réduire l'accumulation de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère – le moteur principal, d'origine humaine, du changement climatique – est coûteux. Cela nécessite soit un changement de politique énergétique, avec la fin de la prépondérance du charbon et du pétrole, soit une technologie complexe pour capturer le CO₂ émis et le confiner pendant des siècles (on parle de séquestration).

Et si nous pouvions à la fois produire de grandes quantités d'énergie et enterrer

les gaz à effet de serre grâce à une méthode rentable et compatible avec l'infrastructure industrielle existante ? Ce scénario pourrait devenir réalité en plusieurs endroits du monde, notamment le long de la côte du golfe, au Sud-Est des États-Unis. Grâce à la configuration géologique particulière de cette région, une énorme quantité de CO₂ pourrait être stockée à plusieurs kilomètres de profondeur. Le gaz serait injecté dans des saumures, des fluides chauds et salés que l'on remonterait à la surface avant de les renvoyer dans le sous-sol. Au passage, on y préleverait du méthane (le principal composant du gaz naturel) et de la chaleur. Les techniques employées seraient dérivées de celles utilisées pour l'extraction du pétrole et du gaz. Pris isolément, ni le stockage ni la production de méthane ou

d'énergie géothermique ne sont économiquement viables, mais ils le deviennent quand on les combine.

Les énormes quantités de CO₂ émises par les activités humaines ne peuvent être stockées dans un réservoir classique et l'unique endroit assez grand est le sous-sol. Dans la couche supérieure de la croûte terrestre, sur une épaisseur de quelques kilomètres, les pores des roches sédimentaires pourraient contenir des siècles d'émissions. Pour réduire de 15 pour cent la quantité de CO₂ envoyée dans l'atmosphère par les États-Unis, il faudrait en séquestrer jusqu'à une gigatonne chaque année. Environ quatre gigatonnes de pétrole brut et deux gigatonnes de gaz naturel sont extraites par an dans le monde. Ces ordres de grandeur suggèrent que la séquestration

© 1991 John Arvidson/Matton Collection/Corbis

Technologie 45

gisements s'épuisent et l'ère du pétrole et du gaz « faciles » est révolue. La demande continuant de croître, les exploitants se tournent vers des formes moins accessibles de carburants fossiles.

Au cours des cinq dernières années, l'augmentation de la production américaine de pétrole et de gaz a surtout résulté de la fracturation hydraulique de schistes profonds. Les combustibles y sont moins concentrés que dans les gisements traditionnels, leur récupération est lente et difficile, et pose des problèmes environnementaux, mais ils sont présents en quantités considérables. En 2012, les États-Unis ont extrait quelque 255 milliards de mètres cubes de gaz de schiste, d'une valeur de 25 milliards de dollars (18,5 milliards d'euros).

Le méthane dissous dans la saumure pourrait être encore plus abondant, malgré une concentration cinq fois plus faible que dans les schistes. Il représentera sans doute la prochaine réserve exploitée. Pour la côte du golfe uniquement, il y aurait de l'ordre de un million de milliards de mètres cubes de méthane. Pour comparaison, les États-Unis ont consommé au cours des dernières décennies entre 560 et 710 milliards de mètres cubes de gaz naturel par an.

L'immensité des réserves de gaz dissous dans les saumures a poussé le Département de l'énergie américain à effectuer quelques tests dans les années 1970 et 1980. Des puits ont été creusés et de la saumure a été remontée à la surface, mais les coûts n'étaient pas compétitifs.

Chauffer grâce à l'énergie géothermique

Ce n'est toujours pas le cas, mais la production combinée d'énergie géothermique pourrait changer la donne. Sur une échelle de temps humaine, la chaleur interne de la Terre durera indéfiniment. Son exploitation requiert des puits d'injection et d'extraction, techniques déjà disponibles et utilisées pour d'autres ressources du sous-sol. La principale raison pour laquelle l'énergie géothermique véhiculée par la saumure n'est pas plus exploitée est qu'elle est peu dense : à volume équivalent, la saumure contient beaucoup moins d'énergie que celle obtenue en brûlant du charbon, du pétrole ou du gaz (le rapport est d'environ deux ordres de grandeur).

Cependant, cette faible densité énergétique n'est pas problématique pour

L'AUTEUR



Steven BRYANT est professeur d'ingénierie du pétrole et des systèmes géologiques

à l'Université du Texas, à Austin, aux États-Unis.

SUR LE WEB

Plus d'information sur les coûts : ScientificAmerican.com/nov2013/bryant

Quelques chiffres

Le stockage d'une gigatonne de CO₂ par an :

- nécessiterait l'extraction et l'injection de plus de 63 millions de mètres cubes de saumure par jour.

- produirait plus de 110 milliards de mètres cubes de gaz naturel par an, soit un sixième de la consommation américaine.

- fournirait entre 20 et 200 gigawatts de chaleur d'origine géothermique, selon les applications.

certaines applications. Le chauffage et la climatisation, ainsi que la production d'eau chaude, représentent une part importante de l'énergie que nous consommons (près de dix pour cent aux États-Unis, selon le Département de l'énergie). Ces usages pourraient être assurés par la géothermie à basse ou moyenne énergie. En Europe, des pompes à chaleur fonctionnant sur ce principe sont exploitées avec succès depuis de nombreuses années.

Une région idéale au Sud-Est des États-Unis

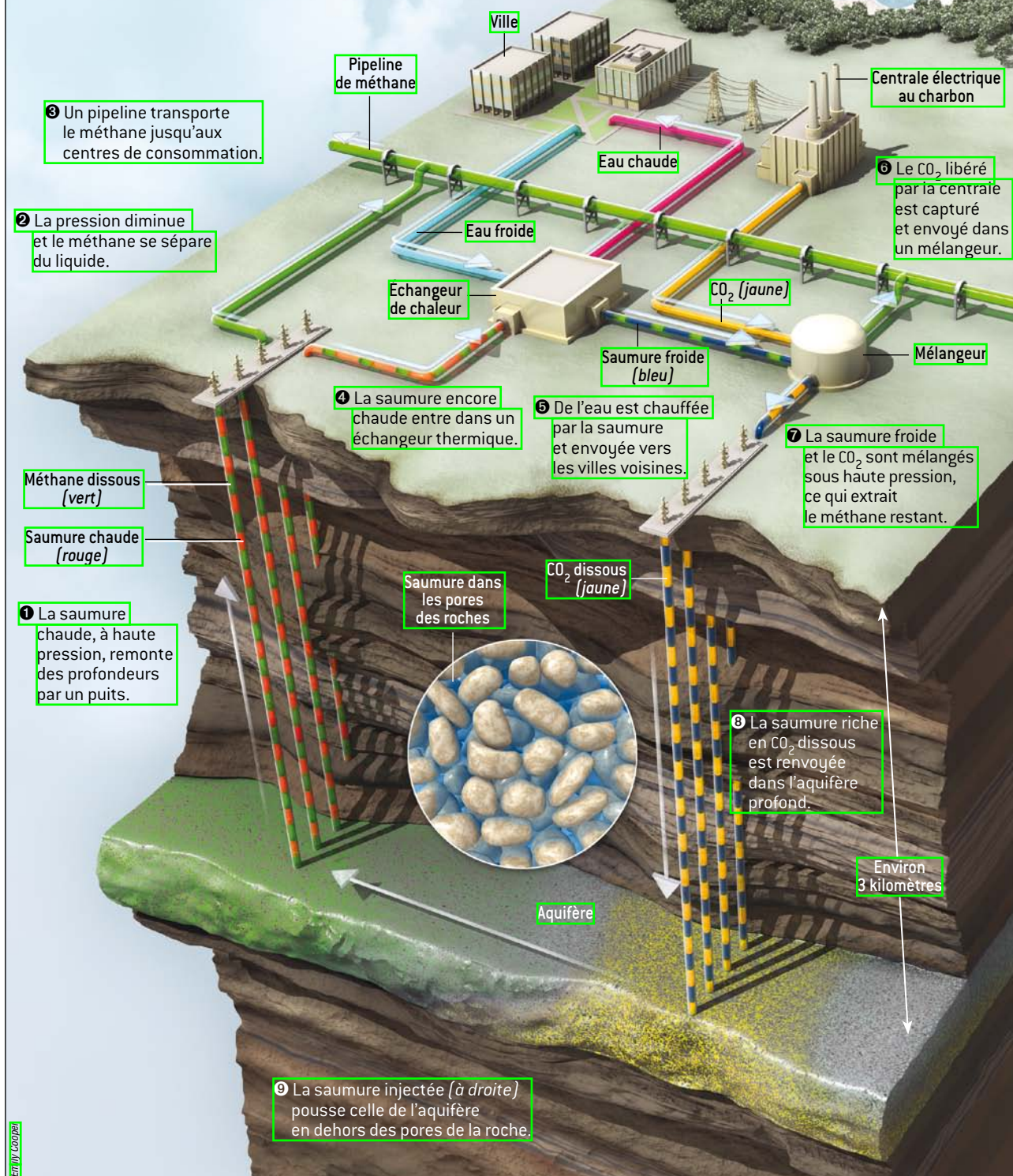
Les dispositifs qui combinent le stockage du CO₂ avec l'extraction du méthane et de la chaleur des saumures séquestreraient-ils assez de gaz pour réduire de façon notable la quantité émise dans l'atmosphère ? Nous l'avons récemment étudié pour la côte du golfe, qui abrite de nombreuses centrales à combustibles fossiles et des industries très émettrices de CO₂.

Du gaz pourrait aussi y être acheminé depuis des sources distantes. La construction des pipelines nécessaires est réalisable, même si elle impliquerait des investissements importants. Ainsi, dans les années 1980, les industriels ont construit plus de 3 400 kilomètres de pipelines dans l'Ouest du Texas pour apporter le CO₂ de réservoirs souterrains naturels à des gisements de pétrole, où il sert à augmenter la quantité de pétrole récupérée. Là encore, la région de la côte du golfe est l'endroit idéal pour le dispositif combiné : outre ses énormes réservoirs de saumure et sa population importante (qui constitue un débouché potentiel pour l'énergie géothermique), elle a une infrastructure de pipelines développée, qui alimente le reste du pays en gaz naturel.

Stocker une gigatonne de CO₂ par an, soit un sixième des émissions actuelles des États-Unis, nécessiterait l'extraction et l'injection de plus de 63 millions de mètres cubes de saumure par jour. Ce débit est élevé, mais pas insurmontable : on pourrait l'obtenir avec environ 100 000 puits (à titre de comparaison, plus d'un million de puits ont été forés au Texas pour le pétrole et le gaz). Il faudra de nombreuses années pour les creuser, mais la réalisation de tout autre dispositif évitant l'émission d'une gigatonne de CO₂ par an prendrait un temps similaire. Si l'on remplaçait des centrales au charbon par des centrales nucléaires, par exemple,

ENTERRER LE DIOXYDE DE CARBONE EN PRODUISANT DE L'ÉNERGIE

Le stockage de CO_2 dans le sous-sol pourrait limiter le réchauffement climatique, mais les procédés actuels sont coûteux. Une nouvelle méthode consisterait à dissoudre le CO_2 dans de la saumure chaude et riche en méthane. Ce dernier serait extrait et vendu, de même que la chaleur de la saumure, pour produire de l'électricité et chauffer les villes voisines. Le méthane pourrait aussi fournir l'énergie nécessaire au dispositif et à la capture du carbone dans les centrales électriques. Le système serait d'abord testé sur la terre ferme, mais, à terme, des installations offshore sont envisageables.



En France, pas de méthane mais des idées !

La France ne disposant pas des réserves d'hydrocarbures des États-Unis, il sera difficile d'y construire le dispositif décrit par Steven Bryant. Cependant, des systèmes combinant stockage géologique du CO₂ et géothermie sont à l'étude. Ils consistent également à dissoudre du CO₂ dans de la saumure issue d'aquifères salins profonds, à en extraire de la chaleur et à renvoyer le liquide dans le sous-sol. Les systèmes géothermiques déjà en place seraient utilisables.

En France, le stockage géologique pourrait être en partie financé par une autre source de revenus : le droit d'émettre du CO₂ est payant en Europe. Des quotas d'émission y sont vendus, même si leur prix est aujourd'hui trop faible et que les mécanismes du marché du carbone doivent être révisés.

Outre les moindres besoins de financement externe, le système combiné a plusieurs avantages par rapport au dispositif classique, qui consiste à envoyer du CO₂ sous une forme thermodynamique particulière, dite supercritique, dans les aquifères salins. D'abord, le gaz est dissous et risque moins de s'échapper, puis de remonter vers la surface. Par ailleurs, on peut mieux contrôler la pression dans l'aquifère grâce aux puits d'extraction, ce qui limite les risques sismiques.

Dans un dispositif classique, le gaz se dissout aussi, mais bien plus lentement (parfois en plusieurs centaines, voire milliers d'années), et son injection continue augmente la pression. En conséquence, on doit surveiller que le CO₂ ne migre pas vers les aquifères d'eau potable, moins profonds, qu'il ne dégrade pas la qualité des res-

sources en eau et qu'il n'accroît pas l'activité sismique.

La quantité de gaz stockable est plus importante sur un site classique : elle est de l'ordre de 20 à 50 millions de tonnes, contre dix fois moins sur un site combinant stockage et géothermie. En effet, le CO₂ est plus compact sous une forme supercritique que sous une forme dissoute.

Au total, il faudra stocker plusieurs gigatonnes de CO₂ en Europe d'ici 2030 pour remplir les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les formations géologiques adaptées ne manquent pas *a priori*, mais certains aspects doivent encore être validés. Pour les dispositifs classiques, plusieurs installations à petite échelle, qui servent de démonstrateurs, sont installées en Europe. En France, seule une installation un peu parti-

culière fonctionne : elle se trouve à Lacq, où le CO₂ est envoyé dans un ancien réservoir de gaz naturel, aujourd'hui vide. Ce type de système est intéressant mais sera loin de suffire. Il faudrait donc développer d'autres sites, en particulier dans le Bassin parisien, qui abrite le plus grand aquifère salin français. Cependant, les financements manquent depuis le début de la crise économique en 2008. Les dispositifs combinant géothermie et stockage du CO₂ sont à un stade plus précoce encore : des études sont menées pour évaluer leur faisabilité et leur viabilité économique, dans le cadre du projet CO₂ Dissolved, financé par l'Agence nationale de la recherche et coordonné par le BRGM.

Pascal Audigane,
BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), Orléans

il faudrait construire 200 réacteurs d'un gigawatt chacun.

Si l'énergie géothermique sert au chauffage, à la climatisation et à la production d'eau chaude, on récupérera une puissance de près de 200 gigawatts, équivalente à celle que fournira le méthane extrait. La demande locale suffira-t-elle à l'absorber ? Cela reste à établir, mais une grande partie de cette puissance pourrait en tout cas être consommée par les nombreuses usines pétrochimiques de la côte du golfe et les dispositifs de capture du CO₂ qui y seraient construits. Si l'énergie géothermique est convertie en électricité avec un rendement de dix pour cent (typique d'une telle conversion), quelque 20 gigawatts d'électricité seront produits, ce qui reste important.

Pour le stockage d'une gigatonne de CO₂, la quantité de méthane produite serait d'environ 110 milliards de mètres cubes par an, soit environ un sixième de la consommation américaine. Sur un siècle, cela représente 100 gigatonnes de CO₂ séquestrées et près de 11 000 milliards de mètres cubes de méthane extraits, soit moins d'un dixième de la quantité estimée dans les aquifères profonds de la côte du golfe. Il y a donc largement assez de place pour stocker du CO₂ et assez de méthane pour une exploitation pérenne.

Si ce méthane est brûlé dans des centrales électriques pendant un siècle, quelque

20 gigatonnes de CO₂ seront émises – à moins que ce gaz ne soit recapturé. En conséquence, la baisse nette de la quantité de CO₂ envoyée dans l'atmosphère serait de 80 gigatonnes.

BIBLIOGRAPHIE

H. Breunig et al., *Regional evaluation of brine management for geologic carbon sequestration*, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 14, pp. 39-48, 2013.

R. Ganjdanesh et al., *Coupled CO₂ sequestration and energy production from geopressured-geothermal aquifers*, *SPE Journal*, en ligne le 24 mai 2013.

B. Gibert et al., *Géothermie : un potentiel à creuser !*, *Dossier Pour la Science*, n° 69, pp. 64-70, 2010.

McM. Burton et S. Bryant, *Eliminating buoyant migration of sequestered CO₂ through surface dissolution*, *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, vol. 12, pp. 399-407, 2009.

15 pour cent des objectifs américains de réduction des émissions

L'association *Union of Concerned Scientists* (littéralement l'Union des scientifiques responsables) estime que pour limiter la concentration de CO₂ atmosphérique à 450 particules par million (le niveau généralement admis pour que le réchauffement ne dépasse pas 2 °C), les émissions des pays industrialisés devront chuter à 25 pour cent de leur niveau de l'an 2000 d'ici 2050. Cela correspond à 150 gigatonnes de CO₂ en moins pour les États-Unis. Même si la séquestration dans la saumure n'atteignait une gigatonne par an que dans 20 ans, elle pourrait représenter 15 pour cent de cette quantité.

Il faudra empêcher autant que possible les fuites de méthane dans l'atmosphère, car ce gaz exerce un effet de serre 20 fois plus puissant que le CO₂. L'Agence américaine pour l'environnement surveille ces fuites et les industriels ont tout intérêt à ne pas laisser s'échapper le produit qu'ils veulent vendre.

Les puits de saumure seraient similaires à des puits conventionnels de pétrole et de gaz, dont la technologie est bien maîtrisée. Les traitements effectués sur la saumure, le méthane et le CO₂ ne seraient pas plus complexes que ceux menés dans les usines pétrochimiques, une autre industrie mature. Finalement, le forage et l'exploitation des puits de saumure ressembleraient beaucoup aux opérations pétrolières pratiquées depuis des décennies. Ils ne nécessiteraient pas, comme les gaz de schistes, l'envoi et l'élimination de fluides chargés en produits chimiques pour fracturer la roche et en extraire le gaz.

Le risque d'augmenter l'activité sismique serait très faible. Des recherches récentes montrent que l'injection de grandes quantités de fluides dans certaines formations géologiques – parfois entreprise pour éliminer les eaux usées – pourrait accroître la probabilité de tremblements de terre. Cependant, le dispositif que nous proposons fonctionne en circuit fermé : toute la saumure injectée est d'abord extraite du même réservoir. Ainsi, la pression moyenne n'augmente

pas. L'accroissement du risque sismique serait même inférieur à celui résultant d'installations géothermiques classiques, où l'eau circule souvent dans des types de roches plus dures et plus susceptibles de déclencher des tremblements de terre.

Des investissements incontournables

Si l'exploitation du méthane et de l'énergie géothermique couvrirait les coûts d'exploitation, la construction du système coûterait cher. L'investissement pourrait être répercuté sur les contribuables, comme c'est souvent le cas pour les centrales électriques, ou se traduire par une augmentation du coût de l'électricité. Mais n'importe quel effort significatif pour réduire les émissions de CO₂ aurait le même effet – que ce soit la construction de milliers de fermes solaires ou éoliennes, ou celle de 200 réacteurs nucléaires pour remplacer les centrales électriques au charbon.

Nos calculs indiquent que le système devrait fonctionner, mais il reste à le tester

sur le terrain. Des chercheurs des laboratoires Sandia et Lawrence Livermore (rattachés au Département de l'énergie américain) et de l'Université d'Édimbourg, en Écosse, conçoivent des moyens d'injecter du CO₂ dans la saumure et d'en extraire de l'énergie. Et deux entreprises, qui souhaitent rester anonymes, envisagent la construction d'un site pilote sur la côte du golfe.

Pour limiter le réchauffement climatique, il nous faut réduire les émissions de gaz à effet de serre le plus tôt possible. La côte du golfe, aux États-Unis, est l'endroit idéal pour un système combinant l'exploitation de la saumure et la séquestration de CO₂. La construction de dispositifs similaires ailleurs augmenterait d'autant l'impact sur les émissions mondiales. Il reste à identifier précisément d'autres sites favorables, susceptibles de se trouver partout où il y a des hydrocarbures, le paramètre critique étant la présence de méthane dans la saumure. On pourrait commencer par chercher en Chine et en Russie, qui ont des émissions croissantes de CO₂ et d'importants bassins pétroliers et gaziers. ■



france culture

LA MARCHÉ DES SCIENCES

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

Aurélié Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

SCIENCE

© 2014 France Culture. Tous droits réservés. Photo: M. D. / Getty Images

Les activités criminelles laissent souvent des traces dans les ordinateurs, téléphones et autres appareils électroniques. Le recueil et l'analyse de ces indices sont devenus une part essentielle des enquêtes judiciaires.

Simson Garfinkel



LES TRACES NUMÉRIQUES DU CRIME

L'ESSENTIEL

■ Les experts en informatique judiciaire recherchent des éléments significatifs dans les mémoires de dispositifs électroniques variés : ordinateurs, téléphones portables, routeurs de réseaux, etc.

■ Pour ce faire, ils ont développé des techniques élaborées, visant par exemple à reconstituer des fichiers partiellement effacés ou à détecter des photos retouchées.

■ Les défis auxquels ils sont confrontés s'accroissent avec l'augmentation de la quantité de données et la diversification des matériels et des logiciels.

POUR LA SCIENCE © SHUTTERSTOCK/DO. JARIS

Depuis les années 1980, les ordinateurs sont de plus en plus présents dans la vie de tous les jours. Le monde du crime n'y échappe pas. Les criminels, comme d'autres personnes, stockent des données et communiquent avec leurs complices. Ces activités laissent des traces dans les appareils utilisés. Cela a conduit au développement de l'informatique judiciaire, qui vise à recueillir et à analyser les indices présents sur tout dispositif doté d'une mémoire numérique : ordinateur, téléphone portable, réseau...

Les experts de ce domaine sont confrontés à certains des problèmes les plus difficiles de l'informatique, tels que l'analyse de données massives et variées, le traitement automatique des langues naturelles et la cybersécurité. Ils sont impliqués dans l'élucidation de deux types de forfaits : ceux perpétrés dans le monde physique, mais dont des preuves sont enregistrées sur un dispositif électronique, et ceux qui sont intrinsèquement liés aux systèmes informatiques, tel le piratage. Nous examinerons ici la façon dont sont stockées les données sur un dispositif électronique, ainsi que les techniques développées par l'informatique judiciaire pour les extraire, les analyser, voire les reconstruire quand l'utilisateur a tenté de les effacer.

L'efficacité de l'informatique judiciaire vient de ce que nombre de systèmes numériques conservent de grandes quantités d'informations. Il s'agit d'examiner aussi bien les ordinateurs et les téléphones portables des suspects de crime que les données électroniques des entreprises lors de litiges. Les enquêteurs récupèrent souvent d'anciens courriers électroniques, des historiques de discussion en ligne, des termes de recherche sur Google ou d'autres types de données, créés des semaines, des mois, voire des années plus tôt. Ces enregistrements peuvent révéler l'état d'esprit d'un individu ou ses intentions au moment où un crime a été commis. Les techniques de l'informatique judiciaire peuvent aussi renseigner sur les victimes : un téléphone retrouvé sur un cadavre non identifié serait étudié de la même façon qu'un appareil perdu pendant un cambriolage.

L'informatisation rend l'enquête plus compliquée que si les données étaient inscrites sur du papier. Par exemple, Bernard Madoff, arrêté en 2008 pour des escroqueries financières, suivait les comptes de ses victimes sur un ordinateur IBM datant des

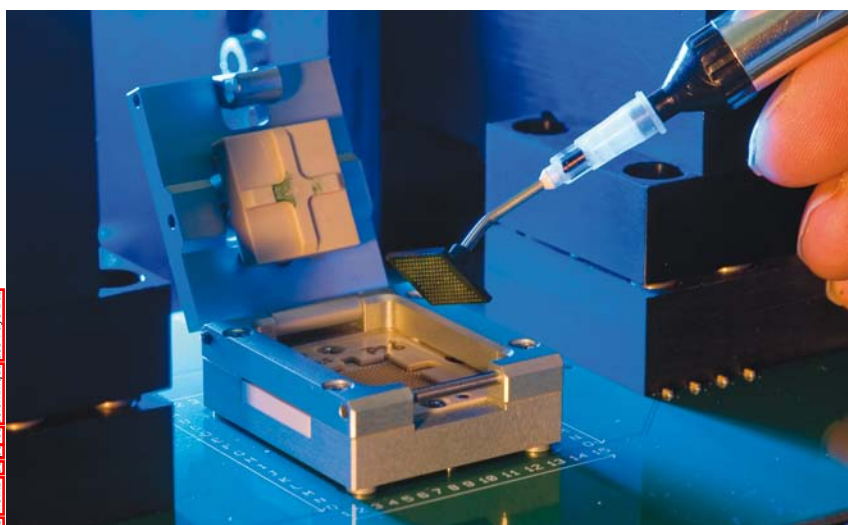
années 1980. L'ancienneté de cette machine explique en partie la durée exceptionnellement longue de la fraude – qui a couru sur plus de deux décennies –, car peu de personnes à Wall Street maîtrisaient encore ce type de matériel. Elle a aussi compliqué l'interprétation des données après l'arrestation de B. Madoff.

Les indices numériques peuvent aussi révéler une absence de manipulation. En mai 2006, un ordinateur portable et un disque dur externe ont été dérobés au Département américain des anciens combattants. Ils contenaient des données sensibles concernant plus de 26 millions de vétérans et d'employés de l'armée. Quand l'ordinateur a été retrouvé en juin 2006, les enquêteurs ont montré que les dossiers sensibles n'avaient probablement pas été consultés. Pour ce faire, ils ont notamment examiné les heures d'accès et de modification associées à chaque fichier. Mais en utilisant les mêmes techniques judiciaires qu'eux, les coupables auraient pu visionner les fichiers sans modifier ces horodatages ; en fait, les enquêteurs ont juste déterminé que les fichiers n'avaient pas été ouverts par des moyens classiques.

Des données volatiles et invisibles

En pratique, les informations obtenues ne sont pas tant limitées par la technologie que par les coûts et les besoins. Le désir intellectuel d'examiner jusqu'au dernier octet est rarement justifié et l'on s'arrête souvent quand on en sait assez pour incriminer un suspect. Les contraintes légales conditionnent aussi la façon dont l'analyse est effectuée.

Les données électroniques nécessitent une attention particulière. Une mauvaise manipulation peut vite les modifier, les endommager ou les effacer. Le simple fait d'allumer un GPS du commerce risque d'entraîner la suppression de preuves cruciales. En outre, les ordinateurs contiennent souvent des informations cachées, pour lesquelles on doit utiliser des outils spécifiques. Par exemple, un appareil photo qui semble contenir 30 photos peut en réalité en renfermer plusieurs centaines, censées être effacées mais en réalité récupérables. En effet, quand un appareil « efface » un fichier, il ne nettoie pas la mémoire, il note juste que l'espace est disponible ; le fichier n'est supprimé que lorsqu'un autre



1. LES OUTILS DE L'INFORMATIQUE JUDICIAIRE permettent d'accéder directement aux puces de mémoire de dispositifs électroniques variés : téléphones portables, appareils GPS, systèmes automobiles, clés USB... On peut ainsi récupérer des données sur des appareils endommagés ou protégés par des mots de passe.

est inscrit par-dessus. Selon un rapport de 2009 du Département de la défense américain, de nombreux disques durs ne sont pas correctement nettoyés avant d'être mis au rebut par le gouvernement.

De nombreuses enquêtes judiciaires commencent par la recherche de fichiers appartenant à l'utilisateur de l'ordinateur. Avant d'examiner les données, on doit les extraire de leur support et les enregistrer de façon fiable et durable. Une bonne compréhension des mécanismes de stockage informatique est nécessaire. Bien que l'informatique soit fondée sur la manipulation de chiffres binaires (0 et 1), les « bits », les ordinateurs modernes font la plupart de leurs calculs sur des groupes de huit bits, les octets. Il y a 256 (2⁸) octets possibles. Les octets sont souvent utilisés pour stocker du texte, chaque lettre étant représentée par une chaîne binaire spécifique. Le système de codage UTF-8, très répandu, représente la lettre A par la séquence 01000001, la lettre B par 01000010, et ainsi de suite. Les bits sont aussi souvent traduits en codes hexadécimaux (comportant 16 éléments de base, à savoir les chiffres de 0 à 9 et les lettres de A à F), notamment pour stocker les images : on associe à chaque pixel un code caractéristique de sa couleur.

Quand ils sont enregistrés sur un disque dur ou sur une carte mémoire, les octets sont groupés en « secteurs », qui font typiquement 512 ou 4 096 octets de longueur.

Deux enquêtes numériques

■ Le 1^{er} janvier 2002, Scott Tyree kidnappe Alicia Kozakiewicz, âgée de 13 ans. Il envoie une photo de l'adolescente à un homme sur la messagerie instantanée de Yahoo. Le destinataire prévient le FBI et lui fournit le nom d'utilisateur de l'expéditeur. Les enquêteurs contactent Yahoo, qui leur donne l'adresse IP correspondante, puis obtiennent les coordonnées du titulaire de cette adresse auprès du fournisseur d'accès à Internet.

■ En 2005, Dennis Rader, tueur en série du Kansas, fait une nouvelle victime avant d'envoyer à la police une disquette contenant une lettre. Les enquêteurs y trouvent un fichier Word mal effacé. Les métadonnées de ce fichier indiquent qu'un certain Dennis est la dernière personne à l'avoir modifié et contiennent un lien vers un temple luthérien où D. Rader est diacre, ce qui permet de le retrouver.

Chaque secteur a un numéro d'identification unique, que l'on nomme l'adresse du bloc logique du secteur. Il faut en général 10 à 20 secteurs pour stocker un courriel, et des centaines de milliers pour un film. Un téléphone portable doté d'une mémoire de huit gigaoctets comporte environ 15 millions de secteurs.

Les secteurs de la mémoire peuvent être stockés sous forme d'une seule longue séquence ou être fragmentés et enregistrés à de nombreux endroits différents. D'autres secteurs contiennent les métadonnées (littéralement, les données sur les données) du système de fichier, c'est-à-dire les informations nécessaires à l'ordinateur pour qu'il retrouve les données.

Des copies intégrales des mémoires

Pour préserver les données d'un ordinateur ou d'un téléphone, chacun des secteurs doit être copié et stocké sur un autre ordinateur, dans un fichier unique nommé image disque ou image physique. Ce fichier contient tous les octets de l'appareil examiné, y compris ceux correspondant aux données « effacées » mais non encore écrasées par le système d'exploitation. En pratique, l'image disque est copiée en plusieurs exemplaires, dont on vérifie la fidélité à l'original en leur associant une signature numérique par la technique dite du hachage. Cette technique a de nombreuses autres applications et son apparition a été un événement majeur de l'informatique judiciaire et de la cybersécurité (voir l'encadré page ci-contre).

On s'intéresse également à la mémoire vive, qui joue le rôle d'espace de travail et de stockage temporaire pour le système d'exploitation et les programmes de l'ordinateur. Cette mémoire est aussi nommée RAM, pour *Random access memory* (mémoire à accès aléatoire), car on peut accéder directement et rapidement à n'importe quelle donnée (tandis qu'un accès séquentiel suivrait un chemin défini). La mémoire vive d'un ordinateur ou d'un téléphone portable est une mosaïque de blocs de 4096 octets qui contiennent des informations variées : code de programmes en cours d'exécution ou qui ont tourné récemment, instructions du système d'exploitation, fragments d'éléments envoyés et reçus par le réseau, morceaux de fenêtres affichées à l'écran, presse-papier (où sont stockées les

Informations quand on utilise la fonction « copier » ou « couper »)...

Pour dupliquer la mémoire vive, on se sert d'un programme spécifique, nommé imageur de mémoire. Tous les types d'appareils électroniques (ordinateurs, téléphones, équipements du réseau tels les routeurs, etc.) ont une RAM, mais ils utilisent des logiciels différents, si bien que les programmes conçus pour analyser certains systèmes ne fonctionnent pas toujours sur les autres. Aujourd'hui, aucune méthode universelle n'existe.

Dans un nombre croissant d'enquêtes, les données à analyser ne sont pas celles enregistrées sur une machine individuelle, mais celles échangées *via* une connexion réseau. Cette connexion est alors mise sur écoute.

La sauvegarde des données n'est que la première étape. On doit ensuite identifier les informations pertinentes pour l'enquête. Certains outils peuvent extraire les fichiers de l'image disque, rechercher ceux qui contiennent un mot ou une phrase particuliers (dans des langues variées), détecter des données cryptées...

Sur un ordinateur, les fichiers dits alloués peuvent être visualisés grâce au système de gestion des fichiers (par exemple dans des répertoires arborescents). Le terme alloué se réfère aux secteurs du disque où le contenu du fichier est stocké: ils sont dédiés à ce fichier particulier et ne peuvent pas être affectés à

L'AUTEUR



Simson
GARFINKEL
est maître
de conférences
à la Naval
Postgraduate

School, à Monterey,
en Californie.

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

d'autres. De nombreux outils d'informatique judiciaire permettent de voir les fichiers alloués d'une image disque sans utiliser le système d'exploitation de l'ordinateur, ce qui préserve l'intégrité judiciaire des preuves.

À la recherche des fichiers perdus

Quand on supprime un fichier, c'est-à-dire quand on le place dans la poubelle de l'ordinateur et qu'on vide cette dernière, l'espace qu'il occupait est dit désalloué. Son contenu peut rester en mémoire, mais le fichier n'est plus visible et les métadonnées permettant de le localiser sont perdues. Un des principaux progrès de l'informatique judiciaire au cours des 15 dernières années concerne la récupération de ces fichiers « supprimés ». On utilise une technique nommée *file carving* (littéralement « sculpture de fichier »), inventée vers 1999 par Dan Farmer, un chercheur indépendant en sécurité.

De nombreux types de fichiers commencent et se terminent par des séquences caractéristiques d'octets, respectivement nommées en-tête et pied de fichiers. Ainsi, les fichiers JPEG créés par les appareils photo numériques commencent en général par la séquence FF D8 FF E0 et se terminent par FF D9. Les premiers dispositifs de *carving* passaient en revue l'image disque à la recherche de ces séquences

Le hachage, technique clef de la cybersécurité et de l'informatique judiciaire

Le hachage a été inventé au début des années 1950 par l'informaticien allemand Hans Peter Luhn, chez IBM. Une fonction de hachage de x bits associe un nombre binaire de taille x , c'est-à-dire comportant x bits, à une chaîne de caractères, tel un extrait de texte. Le terme hachage vient de ce que, en pratique, les fonctions utilisées segmentent les données avant de les mélanger. Une fonction de hachage de 32 bits peut ainsi produire $2^{32} = 4\,294\,967\,296$ valeurs. Ces fonctions sont conçues de façon à obtenir un résultat complètement différent quand on change un seul caractère de la chaîne d'entrée. Certaines chaînes ont la même valeur de hachage (on parle de collision de hachage), mais plus celle-ci est longue, moins cela risque de se produire.

En 1979, Ralph Merkle, alors doctorant à l'Université de Stanford, aux États-Unis, a appliqué le hachage au domaine de la sécurité informatique. Il a utilisé une fonction de hachage produisant plus de 100 bits en sortie et dite à sens unique: il est facile de calculer la valeur de hachage d'une chaîne, mais presque impossible, à partir d'une valeur de hachage, de trouver la chaîne correspondante. L'idée de R. Merkle était d'utiliser la valeur de hachage d'un document comme signature numérique. Le nombre considérable de valeurs de hachage possibles (2^{100} , soit environ 10^{30}) devait empêcher les pirates de trouver celle associée à un document cible. Aujourd'hui, les signatures électroniques obtenues par hachage sont à la base de nombreux

systèmes de cybersécurité, protégeant par exemple les numéros de cartes bancaires envoyés par Internet.

Dans le domaine de l'informatique judiciaire, le hachage sert notamment à vérifier que les copies des données sont fidèles à l'original. Pour un même système informatique, on réalise souvent deux images disques, auxquelles on applique une fonction de hachage. Si les images ont la même valeur de hachage, on suppose qu'elles sont toutes deux une copie fidèle des données d'origine. Tout enquêteur en possession d'une copie ultérieure des données peut calculer la valeur de hachage et vérifier qu'elle correspond à la valeur initiale. De nombreux outils d'informatique judiciaire font automatiquement cette comparaison.

Le hachage est aussi utilisé pour étiqueter des fichiers ou des segments de fichiers connus comme étant « bons », tels les programmes fournis avec les systèmes d'exploitation, ou « mauvais », tels des virus informatiques, des documents volés ou de la pédopornographie. Aujourd'hui, les experts judiciaires distribuent les valeurs de hachage de ces fichiers, afin de faciliter leur détection. Grâce à l'identification de fichiers complets ou partiels par hachage, on peut également déterminer automatiquement si l'un des millions de fichiers que contient un disque dur apparaît dans une base de données renfermant des centaines de millions de fichiers, et ce en un temps assez court, de l'ordre de quelques heures.



2. LES TÉLÉPHONES PORTABLES sont placés dans une cage de Faraday, qui les isole des signaux radio. On minimise ainsi les risques de changement à distance de la mémoire. Celle-ci peut par exemple s'effacer automatiquement après réception d'un texto particulier. En temps normal, la boîte est fermée et l'analyste manipule le téléphone grâce à la caméra interne.

et sauvegardaient tout ce qui se trouvait entre un en-tête et un pied de fichier. Les dispositifs modernes peuvent valider les données qu'ils extraient (par exemple en s'assurant que les octets compris entre un en-tête et un pied caractéristiques d'un fichier JPEG correspondent bien à une photo numérique) et même réassembler les fichiers fragmentés en de multiples morceaux. Ce réassemblage est un défi en raison du nombre de combinaisons de fragments possibles. Il se complique encore quand certains fragments manquent, en particulier quand les données sont compressées.

La compression, très utilisée en informatique, permet d'économiser de la place. L'idée est d'exploiter les redondances : ainsi, quand on compresse la séquence de caractères « tendre tendreté », l'ordinateur remplace la chaîne « tendre » qui apparaît dans « tendreté » par un pointeur vers la première occurrence de cette chaîne. Un texte en anglais se compresse typiquement jusqu'à un sixième de sa taille d'origine.

Un fichier de texte doit être compressé par des algorithmes dits sans perte, qui autorisent une restauration fidèle de l'original quand les données sont décompressées. En revanche, les photographies et les vidéos sont en général compressées par des algorithmes avec perte, qui exploitent les défauts du système de perception humain. Par exemple, quelques dizaines de pixels de couleurs légèrement différentes peuvent

être remplacés par un rectangle uniforme. Les économies ainsi réalisées sont énormes. Sans compression, une heure de vidéo plein écran peut occuper 99 gigaoctets, tandis que la même vidéo compressée ne prend plus que 500 mégaoctets, soit environ 200 fois moins.

Il est difficile de récupérer les données quand le fichier compressé est corrompu ou partiellement manquant. Il y a cinq ans, on échouait souvent à reconstituer le moindre élément utile, mais depuis, des progrès notables ont été accomplis.

La mémoire vive est difficile à analyser car elle change vite, de l'ordre de plusieurs milliards de fois par seconde, et s'efface quand on éteint l'ordinateur.

En 2009, Husrev Sencar, de l'Université TOBB d'économie et de technologie, en Turquie, et Nasir Memon, de l'Institut polytechnique de l'Université de New York, ont développé une technique pour afficher un fragment de photographie au format JPEG même si le début et la fin du fichier sont manquants. En 2011, Ralf Brown, de l'Université Carnegie Mellon, aux États-Unis, s'est intéressé aux fragments de fichiers de texte compressés avec les algorithmes ZIP ou DEFLATE ; il a élaboré une méthode pour les récupérer même quand des informations critiques pour le réassemblage manquent. Cette méthode consiste à balayer les nombreuses façons

différentes dont un document peut être décompressé, puis à choisir le résultat le plus probable en fonction de la langue dans laquelle on suppose que le document a été écrit.

La mémoire vive pose des problèmes spécifiques. Elle est difficile à analyser, car son contenu change vite – de l'ordre de plusieurs milliards de fois par seconde – et s'efface quand on éteint l'ordinateur. En outre, la façon dont les programmes stockent l'information dans cette mémoire est rarement fournie par leurs concepteurs et change d'une version à l'autre d'un même programme. Par conséquent, les informaticiens judiciaires doivent décortiquer chaque version pour découvrir son fonctionnement. Ainsi, l'analyse est longue, difficile et incomplète.

Au cours des dernières années, des techniques dites d'analyse syntaxique ou de parsing ont été développées pour étudier la mémoire vive. On dispose aujourd'hui d'outils capables d'indiquer la liste des processus en cours, le contenu du presse-papier ou l'image visible à l'écran de l'ordinateur au moment où cette mémoire a été enregistrée. Outre leur intérêt pour les enquêtes, ces outils servent beaucoup à l'analyse des logiciels malveillants, tels les virus et vers informatiques, ainsi que les actions d'un pirate lors d'une intrusion informatique.

Quand on récupère des photographies ou des vidéos, la question de leur authenticité se pose : ont-elles été retouchées ? De telles pratiques avaient cours bien avant l'arrivée du logiciel *Photoshop*. Par exemple, après son élimination lors d'une purge stalinienne dans les années 1930, Avel Enoukidzé, l'un des principaux dirigeants soviétiques, a été méticuleusement supprimé des photographies officielles par une série d'habiles manipulations des négatifs.

Aujourd'hui, les ordinateurs autorisent des trucages d'une qualité sans précédent et l'élaboration de scènes virtuelles impossibles à distinguer d'enregistrements réels au premier coup d'œil. Néanmoins, grâce aux progrès du traitement d'images, on peut détecter certains artefacts qui indiquent des manipulations. L'examen des reflets lumineux et des ombres révèle parfois qu'une photographie est en fait un assemblage d'images prises dans des environnements physiques légèrement différents. En 2009,

l'informaticien Hany Farid, du Dartmouth College, aux États-Unis, a ainsi montré qu'une photo de groupe avait été créée en rassemblant des personnes de différentes photos : le reflet de l'éclairage dans les yeux des participants ne concordait pas avec leur position dans la scène.

À la pointe de la recherche en informatique judiciaire, des systèmes automatiques visent à assister l'enquêteur dans son raisonnement, en détectant des éléments qui sortent de l'ordinaire, qui sont étranges ou incohérents. De tels éléments peuvent être la trace d'événements intéressants pour l'enquête ou révéler que les preuves ont été falsifiées. À terme, ces systèmes de raisonnement automatique seront probablement la seule façon pour les enquêteurs de faire face aux données de plus en plus nombreuses et diverses. Cependant, les techniques ne progressent que lentement. Des systèmes détectant des incohérences d'horodatage ont par exemple été élaborés (un fichier ne peut pas être supprimé avant d'avoir été créé), mais leur application est compliquée par de multiples paramètres (tel le passage à l'heure d'été ou d'hiver).

Des mémoires qui augmentent plus vite que la vitesse de calcul

L'informatique judiciaire est confrontée à de grands défis, qui risquent de s'accroître dans les années à venir. Les ordinateurs d'aujourd'hui ont en moyenne 1 000 fois plus de mémoire que ceux du début des années 1990, mais ils ne sont que 100 fois plus rapides ; il y a donc moins de puissance de calcul disponible pour traiter chaque octet de mémoire. En outre, le nombre de cas nécessitant la collecte d'éléments numériques augmente bien plus vite que le nombre d'enquêteurs capables de les examiner. Et les indices numériques sont maintenant utilisés par les enquêteurs pour élucider des crimes, tandis que par le passé, ils servaient surtout lors du procès.

Autre difficulté, les téléphones portables peuvent être équipés de programmes d'autodestruction qui effacent leurs données quand ils reçoivent un texto particulier. Pour parer à cette éventualité, on les stocke dans une boîte métallique nommée cage de Faraday, qui bloque les ondes radio. La mémoire de nombreux

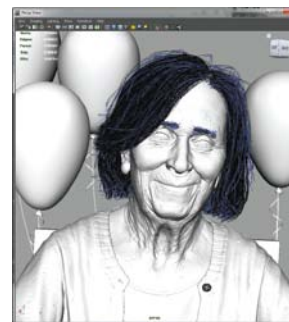
téléphones portables s'effaçant si on les laisse éteints trop longtemps, les cages de Faraday doivent être équipées de prises électriques et de chargeurs. Elles ne suffisent pas toujours : sur certains téléphones, des appels automatiques au domicile sont programmés et les données s'effacent quand ils n'aboutissent pas ; sur d'autres, des algorithmes de cryptage trop puissants pour être déchiffrés par la police scientifique sont utilisés.

Le travail des enquêteurs est encore compliqué par l'émergence des techniques de stockage de données sur Internet. Le téléphone peut ne contenir aucune donnée du suspect et n'être qu'un outil pour accéder à un serveur. L'expert qui analyse l'appareil n'est pas nécessairement autorisé à utiliser les informations qu'il trouve pour accéder aux données stockées à distance. Pire, ces données ont parfois été effacées après la saisie par un collaborateur du suspect.

Outre ces questions techniques, le plus grand défi auquel est confrontée l'informatique judiciaire aujourd'hui est le manque d'experts qualifiés. Leur recrutement est bien plus compliqué que dans d'autres domaines, car ils doivent avoir une vaste connaissance des systèmes informatiques, des programmes et des formats de données, présents comme passés. En d'autres termes, ils doivent être généralistes dans une société qui privilégie de plus en plus la spécialisation.

Une approche intéressante consiste à appliquer les outils de l'informatique judiciaire à d'autres domaines, afin de stimuler la recherche et d'élargir la base des utilisateurs. Ils sont déjà utilisés par les professionnels de la sécurité, qui s'en servent pour analyser les intrusions dans les réseaux et bloquer les accès exploités par les pirates, ou par les entreprises de récupération de données, qui reconstituent des fichiers endommagés ou supprimés par erreur. D'autres applications sont possibles, consistant par exemple à vérifier qu'on n'a pas laissé involontairement des informations professionnelles ou personnelles sur un système informatique.

Quoi qu'il en soit, les spécialistes de l'informatique judiciaire seront confrontés à des volumes de données et une complexité des systèmes toujours plus grands. Les détectives numériques sont engagés dans une course aux armements non seulement avec les criminels, mais aussi avec les développeurs des systèmes informatiques. ■



3. LES IMAGES DE SYNTHÈSE
et les retouches numériques de photographies sont devenues si réalistes que des techniques élaborées sont nécessaires pour les reconnaître. Le personnage ci-dessus est factice (en haut, une étape préliminaire de son élaboration).

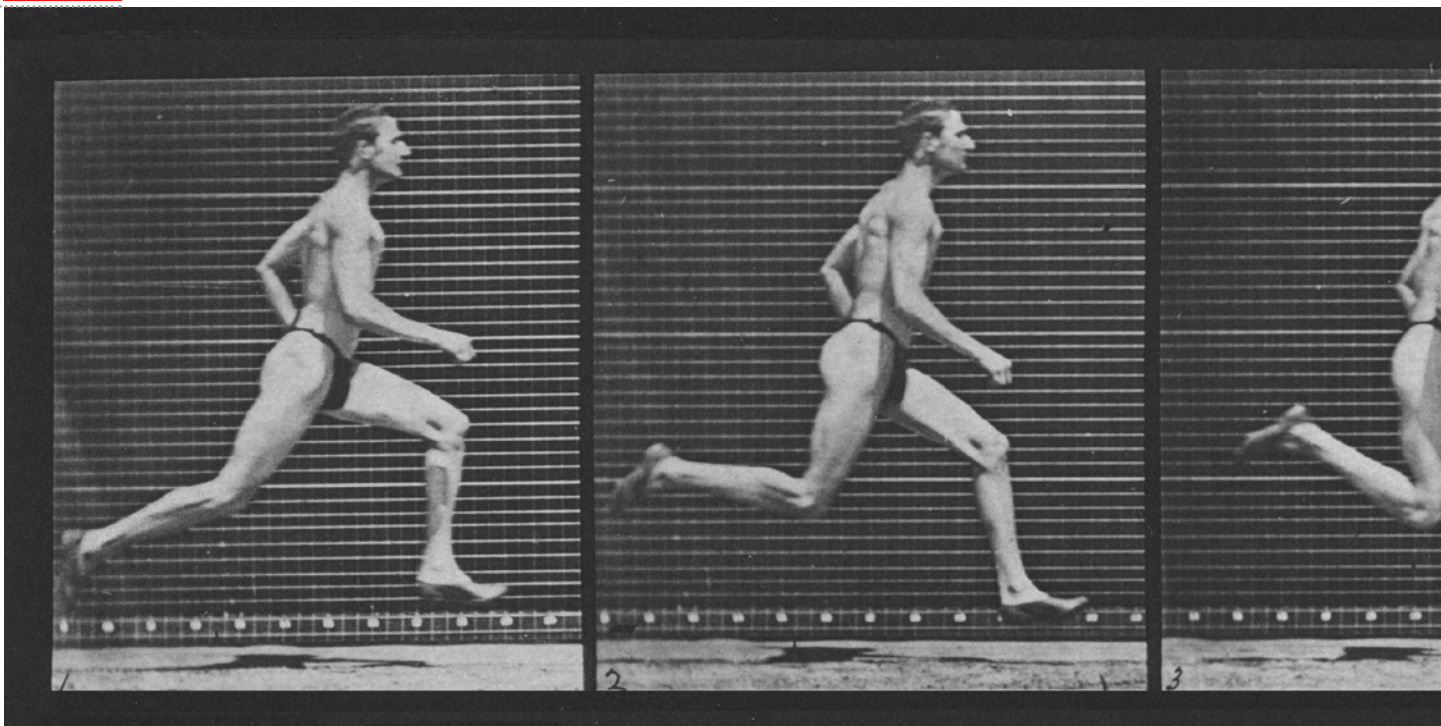
BIBLIOGRAPHIE

R. Brown, *Reconstructing corrupt DEFLATEd files*, *Digital Investigation*, vol. 8, pp. S125-S131, 2011.

S. Garfinkel, *Every last byte*, *Journal of Digital Forensics, Security and Law*, vol. 6, pp. 7-8, 2011.

R. Walls et al., *Effective digital forensics research is investigator-centric*, *Proceedings of the Sixth USENIX Workshop on Hot Topics in Security*, pp. 1-7, 2011.

S. Garfinkel et al., *Using purpose-built functions and block hashes to enable small block and subfile forensics*, *Digital Investigation*, vol. 7, pp. S13-S23, 2010.



Les bienfaits du sport

Shari Bassuk, Timothy Church et JoAnn Manson

Une activité physique régulière réduit le risque de développer diverses maladies par de multiples mécanismes que l'on commence à décrypter.

Faire du sport est bon pour la santé. Sans doute, puisque cette « vérité » nous est régulièrement rappelée. Mais pourquoi ? Pourquoi une activité physique régulière améliorerait-elle notre santé et nous maintiendrait-elle en forme ? Avant d'expliquer pourquoi, rappelons que diverses études ont montré, entre autres, que bouger régulièrement réduit le risque de développer un diabète, de mourir d'un accident vasculaire cérébral ou d'une crise cardiaque, prévient certains cancers, améliore le moral, fortifie les os, renforce les muscles, augmente les capacités respiratoires, réduit les risques de chutes et de fractures chez la personne âgée, aide à contrôler l'excès de poids, etc. !

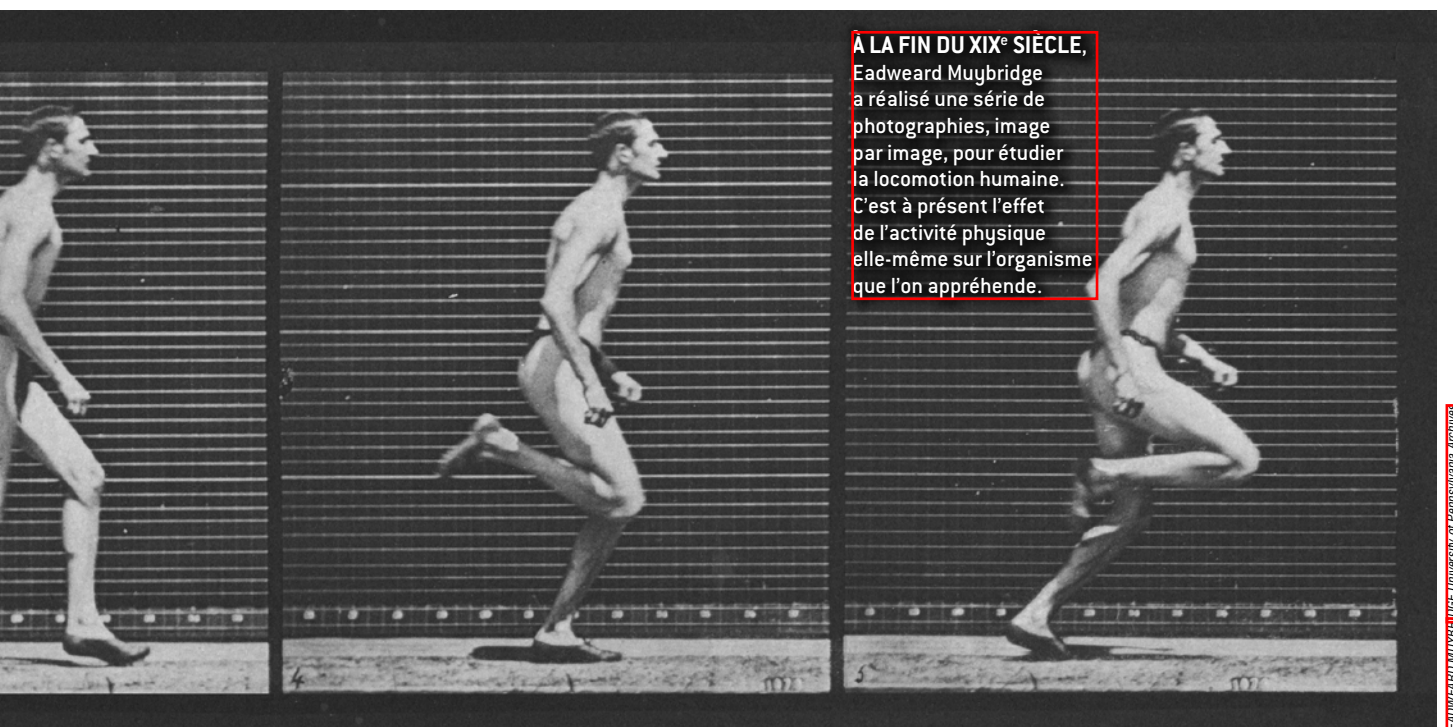
Ces dernières années, les recherches dans ce domaine ont explosé, étendant encore ces observations. Entre autres, l'exercice stimulerait le cerveau – et surtout l'aptitude à mener à bien des tâches qui exigent de l'attention, de l'organisation, de la planification – et réduirait les symptômes de la dépression et de l'anxiété chez certaines personnes. De plus, les bio-

logistes commencent à comprendre les mécanismes déclenchés à l'échelle des cellules et des molécules par une activité physique régulière.

150 minutes d'activité modérée par semaine

Des études sont aussi menées pour savoir comment les divers systèmes de l'organisme – cardiovasculaire, digestif, endocrinien, nerveux, etc. – sont modifiés par l'exercice physique. Elles suggèrent que les bénéfices résulteraient d'une petite amélioration de nombreux aspects physiologiques et non d'un effet important limité à quelques processus biologiques.

On s'est aussi aperçu qu'il n'est pas besoin d'être un adepte du triathlon pour recueillir les fruits de l'exercice physique. Il y a 20 ans, les experts en médecine préventive ne prônaient que l'activité intense. Aujourd'hui, ils insistent aussi sur les bénéfices de séances régulières et modérées. L'une d'entre nous (JoAnn Manson) a contribué à démontrer les bienfaits comparables,



A LA FIN DU XIX^e SIÈCLE,
Eadweard Muybridge
a réalisé une série de
photographies, image
par image, pour étudier
la locomotion humaine.
C'est à présent l'effet
de l'activité physique
elle-même sur l'organisme
que l'on appréhende.

EADWEARD MUYBRIDGE / THE UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA / AGENCE

sur la santé

sur la santé, de l'exercice physique intense ou non, dans le cadre d'études à grande échelle. Conduites de 1976 à 1989, ces études, réalisées sur 238 000 infirmières volontaires, sont parmi les plus vastes menées sur les facteurs influant sur la santé des femmes. À partir de leurs données et d'autres, les dernières directives relatives à l'exercice physique de l'Organisation mondiale de la santé, publiées en 2010, recommandent de pratiquer au moins deux heures et demie d'activité modérée par semaine (la marche rapide, par exemple) ou une heure et quart d'une activité d'endurance soutenue, tel le jogging, une fois par semaine, ainsi que des exercices de renforcement musculaire au moins deux jours par semaine.

Examinons quelques-unes de ces découvertes et des multiples voies par lesquelles l'exercice physique protège et entretient l'organisme. Mais auparavant, rappelons comment le corps réagit à une activité physique accrue. Randonnée en raquettes, natation, marche rapide sur la plage, faire de l'exercice peut prendre de multiples formes et se pratiquer de

L'ESSENTIEL

■ Une activité physique régulière, qu'elle soit modérée ou soutenue, réduit le risque de mourir d'une maladie cardiaque, d'un accident vasculaire cérébral, d'un cancer ou d'autres maladies.

■ Plusieurs mécanismes par lesquels l'exercice agit sur l'organisme ont été récemment mis au jour.

■ Notamment, on comprend mieux pourquoi il favorise la mémoire et facilite le transport du cholestérol, et comment l'organisme s'adapte.

façon plus ou moins soutenue. L'aérobic, par exemple, fait partie des sports qui augmentent considérablement la quantité d'oxygène consommée par les muscles et exigent, par conséquent, un intense travail des poumons. Mais des activités physiques plus statiques – le lever de poids, les exercices d'équilibre – ont aussi leur utilité.

Les scientifiques ont mis au point des méthodes rigoureuses pour mesurer l'intensité des exercices d'aérobic. Il existe aussi un moyen efficace et moins coûteux d'évaluer l'effort produit : le test de la parole. Si votre cœur bat un peu plus vite, qu'il vous est plus difficile de respirer, mais que vous pouvez encore parler ou réciter un poème tout en bougeant, c'est que votre activité reste modérée. Au contraire, si vous ne parvenez plus qu'à balbutier un ou deux mots, c'est que l'exercice est devenu intense. Enfin, si vous pouvez chanter, cela indique que l'exercice est de faible intensité.

Quand on accélère la cadence, le système nerveux prépare les organes à l'action. La conscience est plus aiguë, le rythme cardiaque accélère, la respiration se fait

plus rapide et on transpire légèrement. Le flux sanguin diminue vers les organes qui ne contribuent pas au mouvement, tels que l'appareil digestif et les reins, tandis que les vaisseaux sanguins des muscles sollicités se dilatent, entraînant un afflux de sang riche en oxygène vers ces tissus.

Dans les cellules musculaires, l'oxygène migre vers les mitochondries, des compartiments qui fournissent leur énergie aux cellules. Le carburant des mitochondries est le glucose que l'organisme produit à partir des aliments. Combiné au glucose, l'oxygène déclenche une combustion très efficace, produisant presque 20 fois plus d'énergie par molécule de glucose qu'en l'absence d'oxygène.

Bon pour la mémoire

Dans un premier temps, l'organisme brûle les molécules de glucose stockées dans le foie et les muscles sous forme d'un composé nommé glycogène. Au cours de l'activité physique, le stock de glycogène disponible diminue et les molécules de triglycérides (ils contiennent des acides gras) deviennent la source principale de carburant. La combustion donne certains sous-produits, tels l'acide lactique et le dioxyde de carbone, qui, des muscles, passent dans le sang. La concentration accrue de ces composés provoque des réactions biochimiques dans le cerveau, les poumons et le cœur, lesquelles facilitent leur élimination.

Les bienfaits de l'exercice se font sentir quand celui-ci devient une routine. L'organisme s'adapte aux exigences accrues dont il fait l'objet et acquiert de l'endurance à mesure que la personne devient plus performante. Par exemple, les poumons absorbent davantage d'oxygène à mesure que la respiration devient plus profonde et que le cœur pompe plus de sang à chaque battement. Les modifications biologiques qui en résultent améliorent la santé à long terme.

De nombreuses données confirment les effets de l'exercice physique sur l'organisme, qu'il s'agisse des mécanismes physiologiques ou de l'activité de certains gènes (voir l'encadré page ci-contre et l'article de David Meyre, page 62). Nous nous concentrerons ici sur quelques mécanismes récemment découverts qui contribuent à expliquer pourquoi l'exercice physique accroît les capacités cognitives, améliore le contrôle de la concentration de glucose dans le sang et renforce le système cardiovasculaire.

LES AUTEURS



Shari BASSUK est épidémiologiste au Brigham and Women's Hospital, à Boston, aux États-Unis,

et chercheuse associée à la Faculté de médecine Harvard, à Boston.



Timothy Church dirige le Laboratoire de recherche en médecine préventive.

Il est professeur au Centre de recherche biomédicale Pennington à l'Université de Louisiane, aux États-Unis.



JoAnn Manson dirige le Département de médecine préventive au Brigham and Women's Hospital.

Elle enseigne l'épidémiologie à l'École de santé publique de l'Université Harvard.

Depuis longtemps, les athlètes savent que le sport est bon pour le moral et améliore la santé psychique. Mais ce n'est qu'en 2008 que l'on a pu mesurer l'état d'euphorie des sportifs après un effort prolongé. On a montré que le cerveau libère plus d'endorphines (des hormones comparables aux opiacés qui procurent un sentiment de plaisir) durant une course de fond que pendant un exercice de courte durée, et que ces substances sont actives dans des régions du cerveau responsables des émotions fortes.

Plus récemment, des neuroscientifiques se sont intéressés aux modifications chimiques du cerveau associées à l'exercice et qui améliorent la capacité de concentration, de réflexion et de prise de décision. En 2011, une étude réalisée sur 120 personnes âgées de 55 à 80 ans par Kirk Erickson, de l'Université de Pittsburg, aux États-Unis, a montré que l'exercice physique augmente la taille de l'hippocampe, une région du cerveau impliquée dans la mémoire. La région modifiée par l'exercice serait celle qui permet de se souvenir de son environnement familial. Il s'agirait aussi de l'une des rares zones du cerveau qui fabriquent de nouveaux neurones – du moins chez le rat. Les nouveaux neurones aideraient à distinguer des événements et des objets qui se ressemblent. Des études réalisées sur des animaux ont aussi montré que l'exercice physique augmente la concentration du composé responsable du déclenchement de leur croissance – le facteur neurotrophique dérivé du cerveau ou BDNF.

Les travaux sur la façon dont l'exercice physique prévient les maladies cardiaques, quant à eux, remettent en question les mécanismes envisagés. On pensait qu'une activité régulière réduisait les risques cardiovasculaires, notamment en diminuant la pression sanguine et en abaissant la concentration de « mauvais cholestérol », la particule LDL (*low density lipoprotein* ou lipoprotéine de basse densité), dans le sang, tout en augmentant celle du « bon cholestérol », la particule HDL (*high density lipoprotein*). Ce n'était vrai qu'en partie. Si l'exercice physique réduit la pression sanguine chez certaines personnes, pour la plupart des gens, ce bénéfice reste assez limité. De plus, l'exercice physique, en particulier les exercices de résistance tels que la musculation, peut augmenter la concentration de HDL dans le sang – un

changement qui se révèle au bout de plusieurs mois –, mais l'effet est limité.

Un meilleur transport du cholestérol

D'autres analyses ont montré que l'exercice physique agit sur les lipoprotéines LDL davantage en modifiant leurs propriétés qu'en diminuant leur concentration dans le sang. En fait, les lipoprotéines LDL (et HDL) sont des particules constituées de protéines et de lipides qui transportent le cholestérol, un lipide, dans le sang. Produites dans le foie, les particules LDL acheminent le cholestérol jusqu'aux tissus, où il participe à la fabrication des membranes cellulaires (les particules HDL, quant à elles, transportent le surplus de cholestérol vers le foie, d'où il est excrété dans la bile). Les particules de LDL peuvent présenter différentes tailles.

Plusieurs biologistes ont récemment découvert que les particules LDL les plus petites sont les plus néfastes. Par exemple,

elles ont tendance à perdre des électrons qui, au sein des vaisseaux, percutent d'autres molécules ou des cellules et les endommagent. En revanche, les grosses particules LDL, beaucoup plus stables, flottent dans le sang sans entrer en collision avec d'autres molécules.

Or des études montrent aussi que l'exercice physique augmente le nombre de grosses molécules LDL, les moins nocives, tout en diminuant le nombre des petites. Leur proportion est modifiée par la stimulation de l'activité d'une enzyme, la lipoprotéine lipase, dans le tissu adipeux et les muscles. Ainsi, deux personnes ayant des concentrations sanguines de cholestérol similaires ne courent pas les mêmes risques de développer une maladie cardiovasculaire. Une personne inactive, plus susceptible d'avoir une proportion importante de petites particules LDL, aura plus de risques d'être victime d'une crise cardiaque que celle qui pratique un sport régulier.

Une activité physique régulière a une incidence favorable sur un autre composant essentiel du sang : le glucose. Le foie, le pancréas et les muscles squelettiques – qui font bouger la tête, les bras, les jambes et le torse – travaillent de conserve afin d'assurer à chaque partie du corps la dose de sucre dont il a besoin, que l'on soit au repos ou actif. L'exercice physique demandant un travail important des muscles squelettiques, ceux-ci nécessitent un apport accru de glucose. Sur le long terme, les fibres musculaires utilisent le glucose de façon plus efficace, ce qui les rend plus robustes.

Le foie répond à une demande croissante en carburant en libérant des molécules de glucose dans le sang, et le pancréas sécrète l'insuline, une hormone qui favorise l'entrée du glucose sanguin dans les cellules. La glycémie (la concentration de glucose dans le sang) reste ainsi comprise entre 0,7 et 1,4 gramme par litre – du moins chez les personnes non diabétiques. Le maintien de la glycémie est vital : une concentration

QUELQUES BÉNÉFICES ASSOCIÉS À L'EXERCICE PHYSIQUE

Une activité physique soutenue modifie notre corps de la tête aux pieds. Voici un aperçu sur quelques-uns des effets les moins connus.

Système immunitaire

Une activité physique régulière protège le corps des inflammations. Néanmoins, trop d'exercice peut réduire la capacité du système immunitaire à éliminer les micro-organismes pathogènes.

Cancer

L'activité physique réduit le risque de certains cancers, tels le cancer colorectal et celui du sein.

Système musculosquelettique

Des exercices réguliers d'équilibre ou de mise en charge contribuent à éviter les fractures et les chutes. L'activité physique réduit la fatigue quotidienne en augmentant l'efficacité musculaire.

Système nerveux

Faire de l'exercice améliore la fonction cognitive. En particulier, l'aérobic aide les personnes âgées à s'organiser, planifier et se concentrer.

Système endocrinien

Faire de l'exercice améliore l'efficacité de l'insuline et stimule une autre hormone, l'adiponectine. Ces modifications diminuent le risque de diabète de type 2 et de troubles métaboliques.

Génétique

Des gènes spécifiques sont activés ou inhibés selon l'activité physique. Des gènes de prédisposition à diverses maladies métaboliques sont inhibés, diminuant le risque de développer une de ces maladies.

trop faible en glucose peut entraîner le coma, voire la mort en quelques minutes, et trop de sucre dans le sang perturbe le fonctionnement des cellules.

Un moyen de lutter contre le diabète

Quand l'exercice physique est quotidien, les muscles deviennent plus sensibles aux effets de l'insuline. Le pancréas travaille donc moins à la régulation de la glycémie : une concentration plus faible d'insuline fournit les mêmes résultats que les quantités supérieures auparavant. Diverses études suggèrent en outre que l'activité physique favoriserait l'absorption du glucose par une autre voie, indépendante de l'insuline.

Faire plus avec moins d'insuline est particulièrement utile pour les individus souffrant de diabète de type 2. Leur organisme ne parvient plus à réguler la glycémie, souvent parce qu'il est devenu résistant aux effets de l'hormone. L'activité physique est ainsi devenue un élément clé de la gestion du diabète de type 2. Il est aussi maintenant

bien établi que l'activité physique régulière, en améliorant le contrôle de la glycémie, peut prévenir ou retarder la survenue d'un diabète de type 2.

Une concentration importante d'insuline dans le sang – comme c'est le cas chez les personnes diabétiques de type 2 – serait aussi associée à un risque supérieur de développer un cancer, en particulier du sein ou du côlon. Un des rôles de l'insuline serait en effet de déclencher la prolifération de cellules. En réduisant la concentration d'insuline dans le sang, une pratique sportive régulière diminuerait ainsi le risque de développer un cancer.

On a également constaté que les personnes diabétiques semblent retirer davantage de bénéfices de l'activité physique si elle est diversifiée : deux vastes essais cliniques ont montré que la combinaison d'aérobic et d'exercices de résistance améliore plus la régulation de la glycémie que la pratique d'une seule de ces disciplines. La première étude, réalisée en 2007, ne permettait pas de déterminer si les bénéfices étaient dus à la pratique des

deux types d'exercices ou au fait que les personnes concernées s'entraînaient plus longtemps que celles qui ne pratiquaient qu'une seule activité physique. Mais la seconde étude, menée par l'un d'entre nous (Timothy Church), a levé l'incertitude. Quatre groupes ont été constitués à partir de 262 hommes et femmes diabétiques, jusque-là sédentaires : l'un s'adonnant à l'aérobic (tapis roulant), un deuxième à des exercices d'endurance (rameur, par exemple), le troisième pratiquant les deux. Le quatrième – le groupe de contrôle – a enchaîné chaque semaine des séances de stretching et de relaxation.

Les trois premiers groupes ont fourni le même effort sur une même durée (environ 2 heures et 10 minutes par semaine pendant neuf mois). Ils ont tous perdu quelques centimètres de tour de taille, et les deux groupes ayant pratiqué l'aérobic ont amélioré leur forme physique. Mais seuls les participants ayant pratiqué à la fois l'aérobic et un exercice d'endurance ont obtenu une baisse notable de leur glycémie moyenne. Ces bénéfices supplémentaires

Sport et santé en France et en Europe

Les bienfaits de l'activité physique sont aujourd'hui avérés : réduction du risque de maladies cardiovasculaires, des cancers du sein et du côlon, du diabète et des maladies métaboliques ; meilleur contrôle du poids ; amélioration de la santé mentale et de l'estime de soi ; renforcement des capacités d'apprentissage. En outre, l'exercice physique est un déterminant essentiel de la dépense énergétique ; il est donc fondamental pour l'équilibre et le contrôle du poids.

En revanche, les effets de la sédentarité se répercutent tant dans les dépenses de santé publique que dans les pertes de production, en raison des maladies et des décès prématurés qu'elle entraîne. La sédentarité augmente dans nombre de pays, quels que soient leurs revenus, et, avec elle, la prévalence des maladies non transmissibles telles que les maladies cardiovasculaires, le diabète et le cancer. Selon l'Organisation mondiale de la santé, la sédentarité constitue la cause principale d'environ 21 à 25 pour cent des cancers du sein et du côlon, 27 pour

cent du diabète et environ 30 pour cent des maladies cardiaques ischémiques. La sédentarité serait le quatrième facteur de risque de mortalité à l'échelle mondiale après l'hypertension, le tabagisme et une glycémie trop élevée. Les recommandations mondiales sur l'activité physique pour la santé sont donc axées sur la prévention primaire des maladies non transmissibles, même si leur effet se fait aussi sentir sur la prévention de certaines maladies infectieuses.

En France, selon une enquête menée en 2010 entre autres par l'Institut national du sport et de l'éducation physique (INSEP) sur les pratiques physiques et sportives, 20 pour cent des personnes de 15 ans et plus déclaraient avoir pratiqué, au cours des 12 derniers mois, une activité physique ou sportive moins d'une fois par semaine, 11 pour cent n'en avaient jamais pratiqué. En Europe, 40 pour cent des citoyens pratiquent régulièrement une activité physique et sportive, tandis que 39 pour cent ne pratiquent jamais d'activité, selon une étude de 2010 de l'Euroba-

romètre. Par comparaison et de façon générale, les citoyens des pays nordiques et des Pays-Bas sont les plus sportifs de l'Union européenne. Forts de ces constats, plusieurs plans nationaux et européens ont vu le jour ou ont été renforcés.

En France, les actions dans ce sens sont multiples : Plan national de prévention par l'activité physique et sportive (PNAPS 2008), Plan national sport santé bien-être 2012, diverses campagnes. Un quart des objectifs du Plan national nutrition santé 2011-2015 est ainsi consacré à la promotion de l'activité physique et à la lutte contre la sédentarité à tous les âges, notamment par la valorisation des transports actifs.

Une action particulière est menée auprès des adolescents, dont 40 pour cent ne pratiquent pas de sport en dehors des cours dispensés à l'école, parmi lesquels 15 à 20 pour cent sont en surpoids. En 2011, l'étude ICAPS (Intervention auprès des collégiens centrée sur l'activité physique et la sédentarité), conduite de 2002 à 2006 auprès de 1 000 élèves de sixième,

avait montré que la promotion de l'activité physique régulière (notamment en facilitant son accessibilité) permet de prévenir la sédentarité et l'obésité chez les jeunes : au terme des quatre ans de l'expérience, 79 pour cent des jeunes qui avaient bénéficié du dispositif de promotion pratiquaient au moins une activité physique encadrée, contre 47 pour cent des élèves témoins. De plus, l'intervention avait diminué de près de 50 pour cent le risque de surpoids chez les enfants bénéficiaires et avait réduit certains facteurs de risques cardiovasculaires. Depuis, la stratégie mise en œuvre lors de l'étude est déployée sur des sites pilotes et devrait s'étendre, à terme, à l'ensemble du territoire.

À l'échelle européenne, des recommandations en matière d'activité physique ont été formulées dès 2008. Un plan de travail européen sur le sport a été mis en place en 2011 et devrait très prochainement communiquer ses conclusions.

Julien Schipman, Philippe Noiret et Jean-François Toussaint
IRMES, INSEP, Paris

suggèrent que les exercices d'aérobic et d'endurance agissent *via* des mécanismes différents – une hypothèse que diverses équipes, notamment au Centre de recherche biomédicale Pennington, à Baton Rouge en Louisiane (États-Unis), tentent d'exploiter.

De fait, les mécanismes d'adaptation à l'exercice physique régulier sont multiples, comme le suggère la découverte récente d'un ensemble de voies de signalisation et de molécules régulatrices impliquées dans la coordination des réponses adaptatives à l'exercice. La pratique d'un sport régulier, par exemple, renforce les muscles en modifiant la production de protéines régulatrices ou en activant diverses enzymes, les unes stimulant la transformation des fibres musculaires, les autres la reprogrammation du métabolisme musculaire, et d'autres encore, la formation de nouvelles mitochondries, les « usines » de production de l'énergie. Plus ces dernières sont nombreuses, plus les cellules peuvent convertir de glucose en énergie, augmentant ainsi la force et la résistance à la fatigue des muscles (voir l'encadré ci-contre).

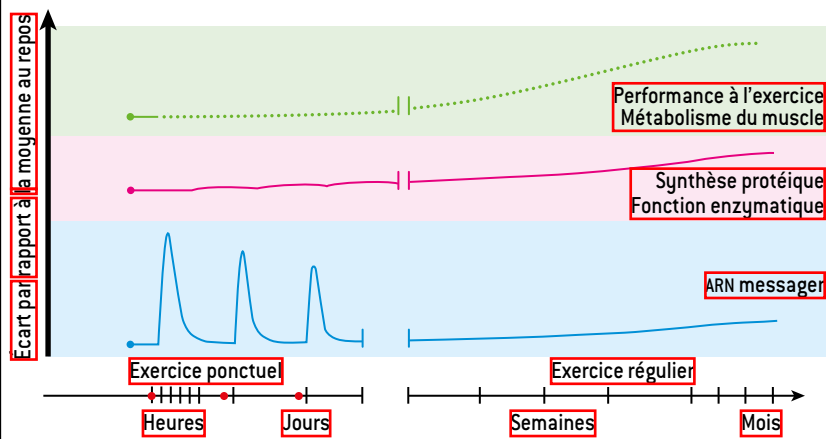
Rester assis est risqué

Malgré les multiples bienfaits de l'exercice physique, même d'intensité moyenne, les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé sont loin d'être suivies. Aux États-Unis, seuls 52 pour cent des adultes suivent les directives en matière d'exercice aérobic et 29 pour cent font travailler leurs muscles 30 minutes, deux fois par semaine, comme il est préconisé. Seul un Américain sur cinq pratique à la fois de l'aérobic et des exercices de résistance musculaire. Les Européens et les Français ne font pas mieux (voir l'encadré page ci-contre).

La difficulté de modifier les habitudes des personnes sédentaires a conduit les scientifiques à s'interroger sur les bienfaits éventuels de séances d'exercices plus brèves et peu intenses, avec l'espoir que des résultats positifs convaincront les plus réfractaires de changer leurs habitudes. Les premières analyses suggèrent que même un minimum d'exercices quotidiens peut prolonger un peu la durée de vie. En 2012 ont été analysées les données de six études ayant suivi pendant environ dix ans un total de 655 000 adultes vivant aux États-Unis. Les personnes consacrant ne serait-ce que 11 minutes par jour à des activités telles que la marche, le vélo,

COMMENT LE MUSCLE S'ADAPTE À L'EXERCICE

Les études montrent que si chaque séance d'exercice stimule les mécanismes d'adaptation, seule la répétition de ce stimulus, et donc une activité physique régulière, modifie les caractéristiques des muscles squelettiques. Après une séance, l'expression d'un gène donné (ici en ARN messenger) augmente de façon rapide pendant quelques heures, entraînant une légère augmentation de la synthèse d'une protéine (ou de l'activité d'une enzyme). La répétition régulière de l'exercice conduit ainsi à l'accumulation de la protéine (une plus grande activité de l'enzyme) en réponse aux pics répétés d'expression du gène. Ce changement augmente la réponse métabolique du muscle à l'exercice, ce qui améliore ses performances. Ces modifications touchent ainsi de nombreux gènes impliqués dans diverses fonctions coopérant au fonctionnement du muscle.



BIBLIOGRAPHIE

B. Egan et J. Zierath, **Exercise metabolism and molecular regulation of skeletal muscle adaptation**, *Cell Metabolism*, vol. 17, pp. 162-184, 2013.

Recommandations mondiales en matière d'activité physique pour la santé, OMS, 2010 : whqlibdoc.who.int/publications/2010/9789241599979_eng.pdf

Sh. Colberg et al., **Exercise and type 2 diabetes**, *Diabetes care*, vol. 33, e147-e167, 2010.

T. Church et al., **Effects of aerobic and resistance training on hemoglobin A1c levels in patients with type 2 diabetes: a randomized controlled trial**, *JAMA*, vol. 304, pp. 2253-2262, 2010.

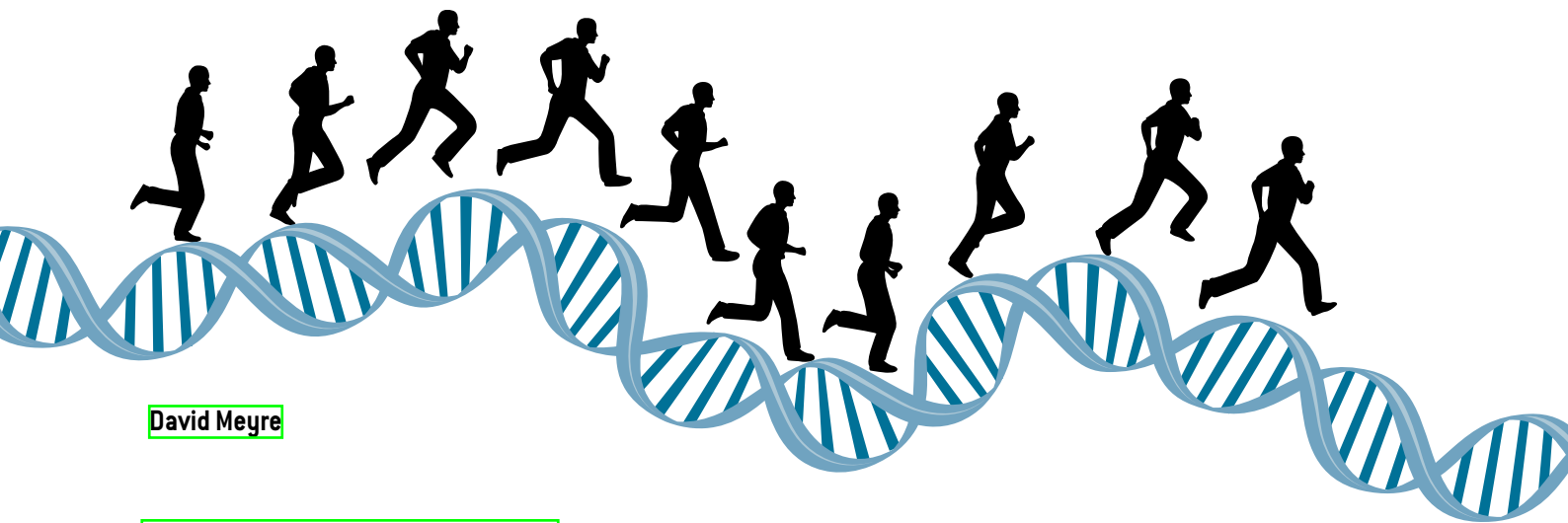
R. Sigal et al., **Effects of aerobic training, resistance training, or both on glycemic control in type 2 diabetes: a randomized trial**, *Ann. Intern. Med.*, vol. 147, pp. 357-369, 2007.

la montée d'un escalier ou du jardinage gagneraient 1,8 année de vie après l'âge de 40 ans, comparées à leurs congénères inactifs. Les participants ayant pratiqué une activité physique modérée telle qu'elle est recommandée par les directives ont quant à eux une espérance de vie supérieure de 3,4 années. Et ceux qui accomplissent entre une heure et une heure et demie d'exercices physiques par jour peuvent espérer 4,2 années de vie en plus.

En revanche, rester assis plus de six heures par jour peut être néfaste pour la santé – et ce, même si l'on pratique quelques séances intenses d'entraînement par ailleurs. Le problème vient-il de la position assise ou de l'absence de mouvement associée ? La question reste ouverte.

Le message de l'ensemble de ces études est clair : bouger de façon régulière et prolongée – tout en gérant le niveau d'intensité de l'activité avec les précautions requises – doit faire partie des habitudes de chacun. Campagnes de santé publique, prescriptions médicales lors de visites de routine, aménagements urbains facilitant l'activité physique, c'est en attaquant la sédentarité par tous les fronts que l'on parviendra à modifier les habitudes. ■

Du sport pour lutter contre les gènes à risque



David Meyre

Le sport est dépassement de soi. Cette citation d'Aimé Jacquet, sélectionneur français de football et champion du monde en 1998, trouve un écho particulier dans les récentes découvertes en génomique. La pratique du sport diminuerait l'impact négatif de nos gènes dans le développement des maladies cardiométaboliques. À l'échelle des populations, les bienfaits du sport sur la santé sont avérés (voir l'article de Shari Bassuk et al., page 56). Cependant, les scientifiques ont remarqué que la pratique d'un sport bénéficie plus à certaines personnes qu'à d'autres. Examinons les découvertes récentes en génomique qui expliquent ces différences entre individus.

En matière de santé, une mauvaise nouvelle arrive rarement seule. Certains individus tendent ainsi à développer simultanément plusieurs complications, rassemblées sous le nom de syndrome métabolique : glycémie élevée (résistance à l'insuline), hypertension artérielle, concentration sanguine élevée de triglycérides, faible concentration de « bon » cholestérol, obésité. Les personnes cumulant au moins trois de ces cinq facteurs de risque sont considérées comme souffrant du syndrome

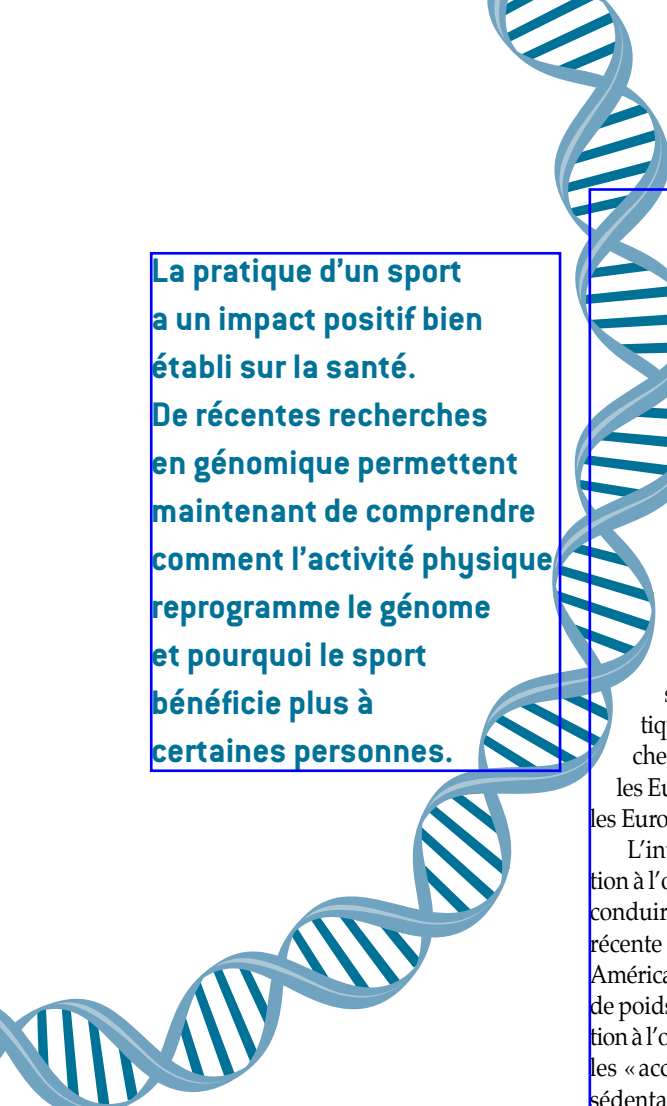
métabolique. La résistance à l'insuline liée au surpoids jouerait un rôle majeur dans l'apparition du syndrome métabolique. Elle touche aujourd'hui un Américain sur quatre et constitue les prémices de complications de santé plus graves telles que le diabète de type 2 ou les maladies cardiovasculaires. Sa fréquence toujours plus élevée dans la population mondiale constitue un enjeu de santé publique de premier plan. L'apparition du syndrome métabolique est favorisée par la « malbouffe », la sédentarité, les perturbateurs endocriniens présents dans notre environnement (pesticides, dioxines), mais aussi par une prédisposition génétique.

Il y a 125 ans, le scientifique anglais Sir Francis Galton rapportait déjà dans ses écrits l'abondance de cas d'obésité dans certaines familles, signe de l'existence d'une composante héréditaire. Le séquençage du génome humain en 2001, suivi de la mise au point de puces à ADN permettant l'étude de millions de variants génétiques, a donné les moyens aux scientifiques d'identifier plusieurs centaines de gènes qui modulent les différentes composantes du syndrome métabolique – des gènes à risque. Cette récente moisson a constitué une occasion

unique d'explorer si les facteurs environnementaux, incluant la pratique d'une activité physique, modulaient l'impact de ces gènes à risque sur le développement de complications métaboliques.

La comparaison de l'indice de masse corporelle (le rapport du poids en kilogrammes par le carré de la taille en mètres) de milliers de vrais et de faux jumeaux (qui partagent respectivement 100 et 50 pour cent de leur génome) a montré que 70 pour cent de la variation de notre corpulence sont pilotés par les gènes. Ce résultat suggère que notre destinée pondérale est déterminée d'avance par la loterie génétique. Cependant, plusieurs études portant sur des jumeaux américains ou nord-européens ont montré que la pratique régulière d'une activité physique non seulement réduit le poids, mais diminue de moitié la contribution des facteurs génétiques dans la détermination de la corpulence. En d'autres termes, il est possible de lutter contre ses gènes à risque grâce au sport.

Les observations sur les jumeaux ont été confirmées par des études sur les gènes de prédisposition à l'obésité dans la population. Les porteurs de deux copies mutées



La pratique d'un sport a un impact positif bien établi sur la santé. De récentes recherches en génomique permettent maintenant de comprendre comment l'activité physique reprogramme le génome et pourquoi le sport bénéficie plus à certaines personnes.

■ L'AUTEUR

David Meyre est directeur de recherche INSERM détaché à l'Unité CNRS UMR8199, à Lille. Il est professeur associé au Département d'épidémiologie clinique et biostatistiques de l'Université McMaster à Hamilton, au Canada.

■ BIBLIOGRAPHIE

S. Ahmad *et al.*, Gene x physical activity interactions in obesity: combined analysis of 111,421 individuals of European ancestry, *PLoS Genet.*, vol. 9, e1003607, 2013.

Q. Qi *et al.*, Television watching, leisure time physical activity, and the genetic predisposition in relation to body mass index in women and men, *Circulation*, vol. 126, pp. 1821-1827, 2012.

H. Choquet et D. Meyre, Genetics of obesity: what have we learned?, *Current Genomics*, vol. 12, pp. 169-179, 2013.

du gène *FTO* pèsent en moyenne trois kilogrammes de plus que les non-porteurs, faisant de *FTO* le plus important contributeur génétique à l'obésité commune. Une étude portant sur près de 220 000 personnes a montré que l'effet du gène *FTO* sur la prise de poids est diminué de 27 pour cent chez les sujets pratiquant une activité physique, même quand celle-ci est limitée. Des résultats similaires ont été obtenus chez 110 000 personnes pour *FTO* et 11 autres gènes de prédisposition à l'obésité. L'effet bénéfique du sport sur la prédisposition génétique à l'obésité semble plus marqué chez les Nord-Américains que chez les Européens, probablement parce que les Européens bougent plus au quotidien.

L'interaction des gènes de prédisposition à l'obésité avec l'environnement peut conduire au meilleur comme au pire. Une récente étude réalisée chez 12 300 Nord-Américains a montré que le risque de prise de poids associé à 32 gènes de prédisposition à l'obésité est multiplié par quatre chez les « accros » du petit écran, une activité sédentaire par excellence.

Un mécanisme épigénétique ?

L'influence du sport sur les gènes de prédisposition ne se limite pas à l'obésité. Ainsi, un essai clinique a porté sur 3 500 sujets prédiabétiques suivis sur trois ans, répartis en deux groupes. Dans le groupe soumis à un programme intervenant sur la prise alimentaire et l'activité physique, cinq fois moins de porteurs de copies mutées de *TCF7L2*, un gène majeur de prédisposition au diabète de type 2, ont développé un diabète, par rapport au groupe contrôle. Si cette étude ne permet pas de mesurer les effets spécifiques du sport sur la prédisposition génétique au diabète de type 2, une étude indépendante portant sur 16 000 Suédois a montré une interaction de l'activité physique et des gènes *PPARG*, *HNF1B* et *CDKN2A/B* de prédisposition au diabète de type 2.

Une interaction du gène de prédisposition à l'hypertension *NOS3*, de l'activité physique et des variations de pression artérielle a aussi été décrite dans trois études indépendantes. Et une étude impliquant 23 000 femmes nord-américaines a montré

une interaction des gènes du métabolisme des lipides, du niveau d'activité physique, de la concentration de « bon » cholestérol et du risque d'accidents cardiovasculaires.

Le lien entre activité physique régulière et réduction des effets délétères de certaines mutations sur le syndrome métabolique tient sans doute à un mécanisme moléculaire dit épigénétique : la méthylation de l'ADN, c'est-à-dire l'ajout de groupes méthyle sur certaines bases nucléotidiques, les constituants de l'ADN. Dans la cellule, la méthylation de l'ADN agit comme un chef d'orchestre de l'expression des gènes. Une faible méthylation favorise l'expression d'un gène alors qu'une forte méthylation l'inhibe.

Les profils de méthylation sont programmés dans les différentes cellules au cours du développement embryonnaire. Cependant, ils peuvent être modifiés chez les mammifères en réponse à des stimulus environnementaux (nutrition, médicaments...). Une équipe suédoise a montré que le sport a un impact majeur sur les profils de méthylation du tissu adipeux : chez 23 hommes sédentaires, six mois d'activité physique régulière ont modifié la méthylation de 7 663 gènes, dont 39 gènes de prédisposition à l'obésité et au diabète de type 2 (parmi lesquels *CDKN2A/B*, *FTO* et *TCF7L2*). La méthylation de l'ADN expliquerait pourquoi certaines mutations sur des gènes de prédisposition aux maladies métaboliques ont plus ou moins d'impact en fonction du niveau d'activité physique.

Les faits sont là : la pratique d'un sport réduit l'effet négatif des gènes de prédisposition aux maladies cardiométaboliques, probablement *via* des mécanismes liés à la méthylation de l'ADN. Ces arguments biologiques solides militent en faveur de l'inclusion du sport dans les programmes de prévention de l'obésité et de ses complications à l'échelle nationale. On rêve déjà à la mise en place de programmes de prévention personnalisée précoces fondés sur le profil génétique des patients. Cependant, l'heure est encore à la découverte des nombreux gènes prédisposant aux maladies métaboliques et dont l'effet peut être modulé par l'activité physique. Notamment, de nouvelles approches coordonnées à l'échelle internationale visent à identifier les gènes de susceptibilité dont l'effet se limite aux personnes les plus sédentaires et qui n'ont pas été détectés par les approches de génétique classiques. ■

Le retour du loup en Europe occidentale

Farid Benhammou

Éliminé au XX^e siècle de l'Europe de l'Ouest, le loup revient aujourd'hui, et avec lui l'hostilité des éleveurs et des chasseurs. Un conflit qu'il importe de bien gérer afin d'assurer à cette espèce une place dans la nature.

Après y avoir été éradiqué au XX^e siècle, le loup, *Canis lupus*, réinvestit l'Europe de l'Ouest. Déjà de retour en France, en Suisse et en Allemagne, l'espèce s'étend actuellement dans toutes les directions. La façon dont se déroule cette reconquête montre que les écosystèmes européens sont en train de recouvrer des qualités perdues – même si, parallèlement, les résistances à la protection de l'environnement perdurent. C'est ce que nous allons étudier ici.

L'imbrication entre espaces naturels et espaces anthropisés n'a rien de nouveau : elle a seulement évolué. Elle était en fait bien plus grande aux XIX^e et XX^e siècles, quand la population européenne était encore très occupée par les activités agricoles. C'est particulièrement vrai pour la France, où le monde rural a été prépondérant jusque dans les années 1930, alors qu'au Royaume-Uni et en Allemagne, le monde urbain dominait

1. LE LOUP, valorisé par certains pour son rôle dans la nature et sa beauté, se fait aussi à nouveau des ennemis dans le monde rural.

© Etna/Infostock.com





déjà. Pour leur part, les espaces ruraux de l'Italie et de l'Espagne étaient alors structurés par de grands domaines dans le cadre de rapports sociaux inégaux. Les conditions de vie des populations rurales européennes étaient rudes. Dans des pays tels que l'Allemagne, elles ont donc émigré massivement vers les villes industrielles ou vers l'étranger. À cette époque, la pression démographique et les besoins en bois de construction ou d'industrie avaient réduit les espaces forestiers à peau de chagrin, de sorte que le loup ne disposait plus que de très peu d'habitats.

Au milieu du XIX^e siècle, le loup a

ainsi disparu de la plus grande partie de l'Europe de l'Ouest. En France, par exemple, la politique nationale d'éradication de la rage et les primes à l'abattage qui l'accompagnaient ont eu des effets redoutables pour *Canis lupus*. Dans les campagnes françaises, on pensait se débarrasser simplement d'un « nuisible », de sorte qu'avec la généralisation des armes à feu et du poison, la chute des effectifs était inéluctable.

Ainsi, un facteur politique – l'existence d'un pouvoir centralisé efficace sur tout le territoire français – et des facteurs techniques – la démocratisation des armes à feu et du poison – ont joué un rôle majeur dans l'extermination du loup.

À ces facteurs directs se sont ajoutés des facteurs indirects : le déboisement des milieux refuges et la disparition des grands ongulés sauvages ont incité le grand prédateur à se rabattre sur les proies domestiques, ce qui a motivé davantage encore sa destruction. La mise en place d'infrastructures de communication et de transport modernes désenclavait de plus en plus de territoires, ce qui a exposé davantage la faune, dont le loup. La pénétration des milieux et des écosystèmes, leur détérioration se sont intensifiées. En cette première ère industrielle, un réseau de chemin de fer, de routes et de chemins a recouvert progressivement l'Europe occidentale, ce qui a fragmenté et réduit drastiquement les dernières populations lupines (voir la figure 2).

Quelques dates caractérisent cette disparition progressive du principal grand prédateur européen. Le loup a d'abord disparu des îles britanniques : en Angleterre au début du XVI^e siècle, en Écosse en 1684 et en Irlande en 1710, ce qui a contribué à doter ces territoires d'un avantage compétitif dans l'élevage ovin. De fait, dès cette époque, ils sont réputés pour la qualité de leur laine. En Suisse, le dernier loup aurait été tiré en 1872. L'espèce lupine a disparu à la fin du XIX^e siècle en Belgique et en Allemagne (tout juste unifiées) après s'être réfugiée dans les forêts des Ardennes et des régions rhénanes.

L'ESSENTIEL

■ L'hostilité des populations

rurales, encore nombreuses au XIX^e siècle, et la destruction de ses habitats ont fait disparaître le loup d'Europe de l'Ouest.

■ En raison de la déprise

agricole, de nombreux milieux convenant au loup se recréent et le font revenir.

■ Sa mauvaise image ayant

cédé la place à une vision positive de son rôle dans la nature, le loup est désormais protégé.

■ Toutefois, une partie

du monde rural lui redevient hostile, ce qui pose un défi aux politiques de protection.

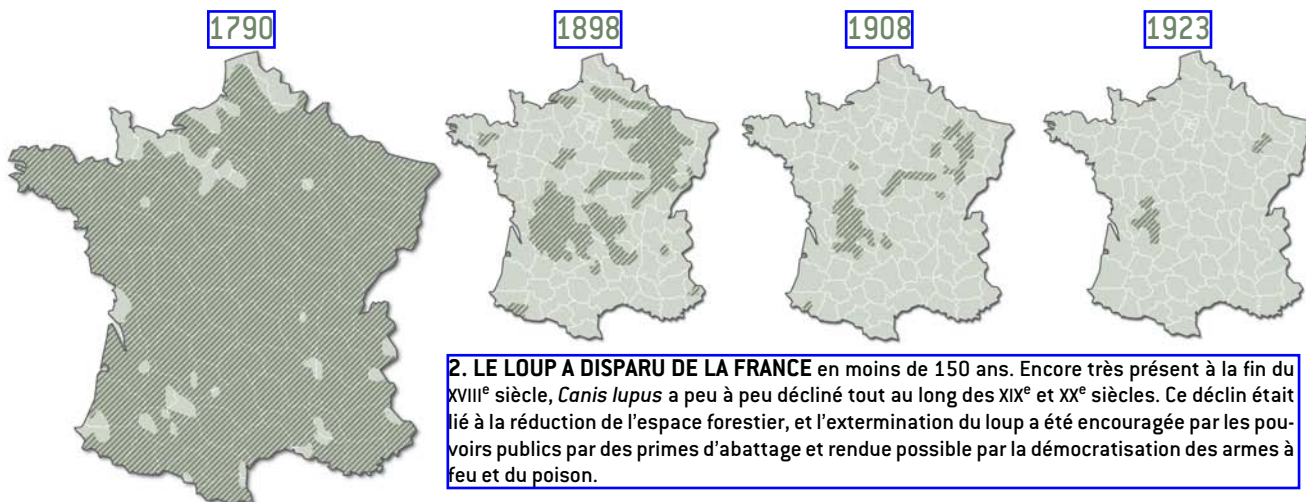
Le grand prédateur s'est toutefois maintenu dans les contrées au développement industriel nul, faible ou tardif de l'Europe centrale et orientale. Dans ces régions où subsistaient les structures féodales, la vague d'extermination ne s'est propagée qu'à partir du début du XX^e siècle, mais sans menacer les populations lupines.

En Europe du Nord non plus, l'élimination n'a jamais été complète. Même s'il est arrivé que les populations baissent beaucoup, les loups circulent dans tout l'espace scandinave, et leurs effectifs sont alimentés par l'important réservoir russe. Dans le Sud de l'Europe, dans les péninsules ibérique et italienne surtout, les populations ont beaucoup régressé dans les années 1970, mais la destruction n'a jamais atteint

l'intensité qu'elle a eue en France.

Dans ce pays, le dernier loup aurait été abattu aux confins du Limousin et du Poitou en 1937. Mais entre cette date et le retour officiel du loup en France en 1992, des individus étaient régulièrement tués ou retrouvés morts. Il s'agissait probablement de restes de la population autochtone, des loups captifs libérés ou encore des pionniers de la recolonisation. Le mystère demeure.

En effet, le loup a longtemps survécu dans toutes les marges et les périphéries de l'Europe. En France, il s'agit de l'Est ou de marges intérieures (zones reculées du Massif central et du centre-Ouest). Constatant la



2. LE LOUP A DISPARU DE LA FRANCE en moins de 150 ans. Encore très présent à la fin du XVIII^e siècle, *Canis lupus* a peu à peu décliné tout au long des XIX^e et XX^e siècles. Ce déclin était lié à la réduction de l'espace forestier, et l'extermination du loup a été encouragée par les pouvoirs publics par des primes d'abattage et rendue possible par la démocratisation des armes à feu et du poison.

L'AUTEUR



Farid BENHAMOU, est géographe et chercheur associé au Laboratoire de géographie

physique (UMR CNRS 8591).

BIBLIOGRAPHIE

O. Liberg *et al.*, Shoot, shovel and shut up: cryptic poaching slows restoration of a large carnivore in Europe, *Proc. R. Soc. B*, vol. 279, pp. 910-915, 2012.

Farid Benhamou, Ours, lynx, loup : une protection contre nature ?, Milan, 2009.

Site officiel français consacré au loup : www.loup.developpement-durable.gouv.fr

QUELQUES CHIFFRES

21 meutes et **250** loups en France en 2013.

2 à 5 individus par meute.

200 à 300 kilomètres carrés par meute.

1,5 million d'euros dépensés par l'État en 2011 pour indemniser les dégâts dus au loup, sur un budget loup total de 9 millions.

survie des loups au début du XIX^e siècle dans les zones frontalières des départements français, l'historien Alain Molinier pointa en 1993 la corrélation entre la présence du loup et un pouvoir politique faible ou un développement moindre dans les confins et les périphéries.

Pour la même raison, le loup a été refoulé aux marges de l'Europe de l'Ouest, et il n'est pas étonnant de constater qu'après les années 1950, les dernières populations viables se situaient à l'Est du rideau de fer.

Avant l'avènement du communisme, de grands propriétaires dominaient les structures agraires dans ces contrées, où la paysannerie, durablement marquée par le féodalisme et le contrôle du droit de chasse, était maintenue dans un statut subalterne. Cela avait préservé une faune que la noblesse se réservait pour la chasse dans de grands domaines forestiers, tel Bielowieza, en Pologne.

La mise en place des démocraties populaires et de la collectivisation ont ensuite maintenu des équilibres dynamiques entre un monde agricole aux techniques plutôt traditionnelles et les grands prédateurs, tel le loup. Contrairement à ce qui s'est produit en Europe de l'Ouest, les grands prédateurs ont continué à disposer de zones refuges où la chasse, souvent réservée aux apparatchiks ou à des fonctionnaires spécialisés, ne nuisait pas aux effectifs.

En 1989, le rideau de fer tombe, alors que les facteurs qui avaient produit la disparition du loup en Europe de l'Ouest ont largement disparu... Dès lors, les marges orientales et méridionales de l'Europe se sont mises à fournir continuellement des pionniers, qui ont amorcé la recolonisation de l'Europe de l'Ouest par le loup à la fin du XX^e siècle.

Plusieurs phénomènes complémentaires d'ordres écologiques, sociaux, politiques et territoriaux contribuent à ce retour du loup dans des pays tels que la France, la Suisse, l'Allemagne et dans des régions d'Espagne et surtout d'Italie où il avait été éradiqué. Tout d'abord, la vision du loup a changé : dans la plupart des pays d'Europe occidentale, il est passé, dans les années 1970, du statut d'un nuisible à éradiquer à celle d'une espèce à protéger. En Europe, deux textes majeurs garantissent la protection de cet animal : depuis 1979, la convention de Berne, puis, depuis 1992 dans l'Union européenne, la directive *Habitats faune flore* (directive 92/43/CEE).

Un nouveau statut juridique pour le loup

Ce retournement de statut juridique est aussi lié à l'évolution de la représentation du loup, qui doit beaucoup à la multiplication des études écologiques et à leur traduction en ouvrages pour le grand public. Ce phénomène a débuté aux États-Unis. Ainsi, David Mech, biologiste au Département de l'intérieur américain (administration chargée de protéger le domaine national américain), est l'auteur de plusieurs travaux pionniers, et il est aussi le fondateur, au Minnesota, du Centre international du loup (*International Wolf Center*), une institution destinée à éduquer le public à propos du loup.

En Europe, les travaux des Italiens Franco Tassi puis Luigi Boitani allaient dans le même sens et ont fait de l'Italie l'un des premiers pays européens à protéger sa population de loups – dès 1973. À l'époque, les seuls refuges du loup

en Europe occidentale se trouvaient en Espagne et en Italie. Si certaines de ces démarches n'étaient pas exemptes d'une certaine idéalisation naïve du loup, elles ont eu le mérite de ramener l'animal à sa réalité biologique, et ainsi de contribuer à le débarrasser de son image de mangeur d'hommes cruel et dévastateur.

Regain de nature...

Simultanément, les activités humaines dans les espaces ruraux ont changé et, avec elles, les milieux et les paysages. L'exode rural amorcé dans l'après-guerre est devenu intense pendant les Trente Glorieuses (1945-1975) et s'est accompagné d'une déprise agricole qui a laissé à la forêt et à l'«ensauvagement» de plus en plus de territoires. Peu à peu, la faune et la flore ont gagné du terrain et les milieux ont retrouvé des dynamiques écologiques riches et variées.

Dans ces espaces, les grands mammifères, tels les grands ongulés sauvages, qui avaient presque totalement disparu de France et d'Italie, sont revenus (voir la figure 5). Les proies vitales pour le loup que sont les sangliers, les cerfs, les chevreuils et les chamois ont vu leurs effectifs se conforter. La politique de maîtrise cynégétique (c'est-à-dire de la chasse) a aussi contribué à cela, les chasseurs ayant été contraints dans les années 1970 de réguler fortement leur activité s'ils ne voulaient pas voir disparaître le gibier. En France, les Plans de chasse, couplés à des systèmes de réserve et des réintroductions, ont permis de repeupler les espaces forestiers. Cependant, dans les Alpes françaises et italiennes, ainsi que dans les monts Cantabriques, en Espagne, les animaux domestiques (brebis, chèvres, chevaux, voire chiens) sont entrés pour une part variable dans l'alimentation du loup, ce qui a créé de grandes tensions.

La présence en ces régions de grands massifs forestiers et d'aires protégées a représenté aussi une aide ponctuelle à la colonisation. En France, en Italie, en Allemagne et même en Belgique, un réseau de parcs et de réserves naturelles plus ou moins connectés facilite l'expansion de l'espèce. Le retour des loups dans le parc du Mercantour (Alpes-Maritimes), par exemple, donne l'impression que l'espèce recherche ce type d'espace. Manifestement, le loup préfère les habitats comportant des zones difficiles d'accès et riches en proies.



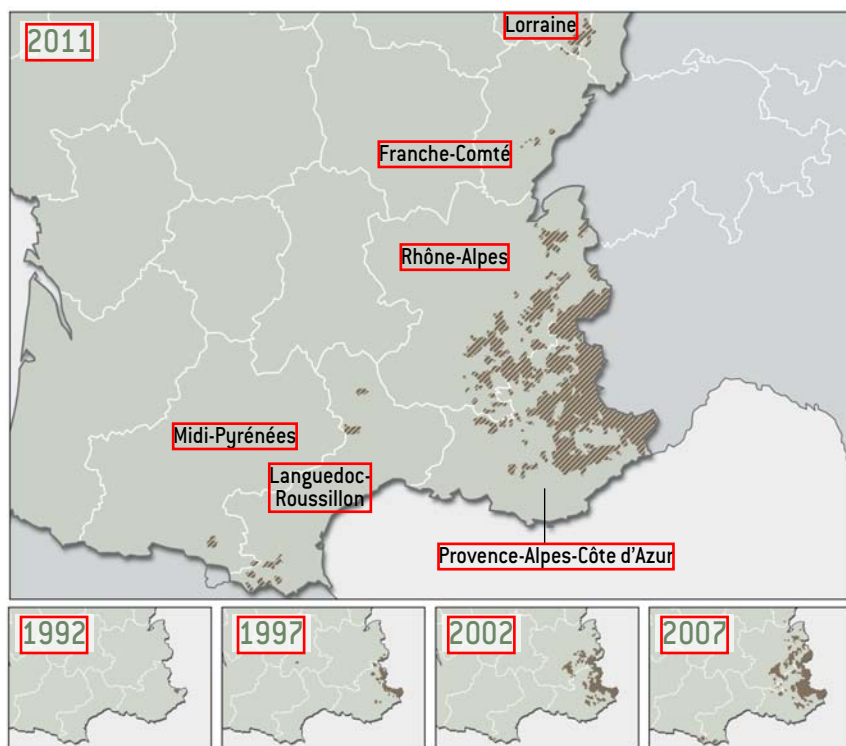
3. CANIS LUPUS ITALICUS, nommé aussi loup des Abruzzes ou loup des Apennins (*ci-dessus*), est la sous-espèce de loup issue d'Italie en train d'investir la France. Très dynamique, l'espèce progresse vite, car chaque meute émet presque chaque année des pionniers (en haut, l'arrivée nocturne d'un pionnier en Ardèche saisie par une caméra automatique), c'est-à-dire des jeunes loups qui partent explorer des territoires nouveaux et lointains à la recherche d'un partenaire.

Cela correspond aux territoires souvent retenus pour des aires protégées. Toutefois, les espaces assez sauvages pour le loup mais non protégés sont majoritaires en Europe. Par ailleurs, ce grand prédateur peut se contenter de milieux relativement pauvres sur le plan écologique. Ainsi, en Castille-La-Manche, en Espagne, le loup parvient à vivre et à se reproduire dans des paysages de grands champs en exploitant le réseau de canaux et de petits bosquets pour se cacher, et en se nourrissant de lapins et de la faune domestique.

... et recolonisation

Si cela ne correspond pas au loup idéal imaginé, *Canis lupus* ne répugne pas à vivre de déchets et à chasser chiens et chats. Cette souplesse lui est utile dans les phases d'essaimage, quand les jeunes exclus des meutes parcourent des dizaines, voire des centaines de kilomètres, avant de s'établir dans une région après avoir rencontré un congénère du sexe opposé. Elle s'illustre dans la présence sporadique de loups en zone périurbaine, tel cet individu photographié au bord d'une piscine en 2003 dans les Alpes-Maritimes ou cet autre loup renversé fin 2008 sur une voie rapide de la zone commerciale de Bourg-lès-Valence. Ces surprises mises à part, la recolonisation du canidé sauvage se fait très discrètement.

Comment cette conquête a-t-elle commencé en France et comment s'y déroule-t-elle ? La renaissance de la population



4. L'EXPANSION DU LOUP EN FRANCE est soutenue, car le pays contient de nombreux habitats vacants convenant à cet animal. La première meute s'est créée en 1992 dans le parc du Mercantour. Depuis, l'aire de répartition de l'espèce a augmenté de 20 à 25 pour cent par an, surtout dans des régions montagneuses où les meutes peuvent vivre en relative tranquillité.

française de loups résulte de l'expansion de la population lupine italienne dite des Abruzzes. À partir du refuge situé dans cette région d'Italie centrale, *Canis lupus italicus* a d'abord recolonisé les Apennins en direction du Nord (voir la figure 6), puis a atteint l'arc alpin, ce qui l'a conduit en France, dans le parc du Mercantour (voir la figure 3).

Parc du Mercantour, 1992

En novembre 1992, lors d'un comptage de chamois, deux canidés ressemblant à des loups y ont été aperçus. Après vérifications et tergiversations, la présence de *Canis lupus* en France fut officiellement reconnue. Mis dans la confidence par les agents du parc, le magazine *Terre Sauvage* publia l'information. Les pouvoirs publics ont dû réagir, alors qu'ils misaient sur la discrétion, au regard de la réputation de l'animal et des mauvaises relations de l'administration du parc avec les élus locaux, les chasseurs et les agriculteurs. Pourtant, dès le début des années 1990, des spécialistes italiens avaient, sans retenir l'attention des autorités, annoncé l'arrivée imminente du loup en France.

Le dynamisme avec lequel la colonisation s'est ensuite poursuivie est surpre-

nant (voir la figure 4). Dès 1997, les loups fréquentent le plateau de Canjuers, dans le Var, le massif du Queyras et les Hautes-Alpes. En 1998, leur présence est attestée dans les Monges (Alpes-de-Haute-Provence). En 1999, ils sont identifiés dans les massifs du Vercors (Drôme, Isère) et de Belledonne (Isère, Savoie). De 2000 à 2003, le loup laisse des traces dans les Préalpes de Grasse, proches de Nice, en Maurienne (Savoie) et dans le Bugey (Ain). Et on le repère dans les Pyrénées-Orientales dès la fin des années 1990 ! À partir de 2006, on le rencontre dans plusieurs départements du Massif central – la Lozère, l'Aveyron, le Cantal, l'Ardèche – et à partir de 2011 dans les Vosges. Aux dernières nouvelles, il est aussi arrivé en Haute-Marne et dans l'Aube. Dans l'ensemble, l'aire de répartition du loup s'est étendue 15 ans durant d'environ 25 pour cent par an en France, et cela malgré les décès accidentels ou les abattages.

En Allemagne, la tendance est la même. Au tournant des années 2000, des loups arrivent outre-Rhin de Pologne. Leur présence est d'abord attestée dans le Lausitz, région forestière riche en cervidés, à cheval entre la Pologne et les *länder* de Saxe et de

Brandebourg. Si 13 des 19 meutes allemandes vivent encore dans cette région, l'espèce a essaimé dans tout le pays. En équipant de jeunes loups de colliers GPS, les biologistes allemands ont mis en évidence que ni les routes ni les cours d'eau ne constituent des obstacles pour ces canidés, qui peuvent par ailleurs franchir des distances énormes. En deux mois, un jeune loup allemand a ainsi traversé la Vistule et l'Oder et parcouru 1 550 kilomètres avant de rencontrer une jeune femelle biélorusse. Dans l'Ouest de l'Allemagne, le loup a fréquenté la Rhénanie du Nord-Westphalie dès 2008 et l'analyse génétique d'un spécimen abattu en Rhénanie-Palatinat, un peu plus au Sud, a révélé qu'il s'agissait d'un loup italo-alpin !

Se profile ainsi une probable jonction entre les loups de souches orientale et nordique et les loups méditerranéens, jonction qui amorcera un précieux brassage génétique. De même, dans le Nord de l'Italie, en Autriche, voire en Suisse, les loups slovénes, eux aussi en expansion, pourraient rencontrer des loups italo-alpins.

Hostilité suisse

Le pays de la Convention de Berne devrait être une terre de recolonisation favorable au loup, qui y est arrivé dès 1995. Or il n'en est rien. En 2012, pas plus de 17 individus ont pu être recensés, dont une minorité de femelles. Plus que la rudesse du milieu montagnard, ce sont des facteurs politiques qui expliquent encore une fois les difficultés du loup en Suisse.

Dans ce pays fédéral décentralisé, le pouvoir important des élus des cantons a pour effet de multiplier les abattages officiels instamment demandés par de puissants groupes de pression agricoles et cynégétiques. À cela s'ajoutent de nombreux tirs illégaux, souvent couverts par les autorités. Même l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) demande régulièrement au comité permanent de la Convention de Berne d'assouplir le statut de protection de l'espèce. Le Fonds mondial pour la nature (WWF) obtient souvent des condamnations des tirs par les tribunaux suisses, mais la plupart du temps après que le mal est fait... *Canis lupus* progresse donc difficilement en Suisse : il n'est arrivé que dans les cantons des Grisons, du Tessin, de Vaud, du Valais et, plus récemment, dans la région située entre Berne et Fribourg.

Il n'empêche : en Europe de l'Ouest, la dynamique de recolonisation par le loup est forte. La situation française l'illustre, puisque dans l'Hexagone, les accroissements des territoires et des effectifs restent actuellement de l'ordre de 20 pour cent par an en moyenne, et ce malgré l'existence d'un braconnage avéré et cryptique (caché), comme l'a étudié le biologiste Guillaume Chapron. Étant donné les espaces rendus disponibles par la déprise agricole, les loups français ne peuvent qu'avoir une grande capacité de dispersion.

C'est bien ce que montre le suivi français :

des spécimens identifiés en Lozère ou dans les Pyrénées-Orientales l'avaient été plusieurs mois auparavant dans les Alpes. Des loups de souche italo-alpine franchissent même la frontière franco-espagnole pour coloniser la Sierra del Cadi, en Catalogne. La jonction avec les loups espagnols ne semble pas s'être faite, parce que leurs populations se trouvent à l'Ouest et au Sud de la péninsule Ibérique (voir la figure 6), et sans doute aussi parce qu'un braconnage efficace en Aragon et en Navarre isole encore les deux populations.

Un retour à gérer

Cependant, l'espèce ne cesse de surprendre, comme le montre la localisation la plus occidentale d'un loup en France : dans le Gers, en novembre 2012. Plus au Nord, fin 2011, c'est dans les Ardennes belges et même aux Pays-Bas que le canidé a été repéré. Les loups choisissent des marges pour opérer leur retour, mais celles-ci sont de plus en plus centrales (voir les figures 4 et 6).

Tout cela implique qu'une « gestion émergente et active » du loup s'impose. Par cette formule, le chercheur Laurent Mermet, d'AgroParisTech, désigne ce qui constitue dans les faits une gestion intentionnelle de l'entité naturelle la plus favorable à sa conservation. Les aspects biologique et politique s'entremêlent et interagissent dès qu'il s'agit de conservation. Or, dans les politiques européennes, la pensée écologiste, qui semble monter en puissance, est contrebalancée par de puissants groupes de pression d'agriculteurs et de chasseurs.

De nombreux problèmes de conservation d'espèces, de milieux et d'écosystèmes subsistent en Europe. Par exemple, la menace pesant sur les abeilles et sur les pollinisateurs sauvages est inquiétante. Pour

autant, une biodiversité remarquable est en train de se redévelopper, signalée de façon emblématique par les retours des grands rapaces, de la loutre, du castor ou encore du loup. S'agit-il là de l'arbre d'optimisme qui cache la forêt des désastres ? Ou des premiers signes pertinents d'un tournant écologique pris en Europe occidentale ? Il est trop tôt pour le savoir, mais il est clair que le retour du loup aura des effets profonds sur les écosystèmes et sur les systèmes sociaux européens.

Malgré la mauvaise réputation acquise par la France en matière de protection de la

LA FRANCE EST EN TRAIN DE DÉPLOYER son Plan national loup, et la perspective européenne permet de prendre un peu de hauteur quant à la macrofaune de l'Hexagone.

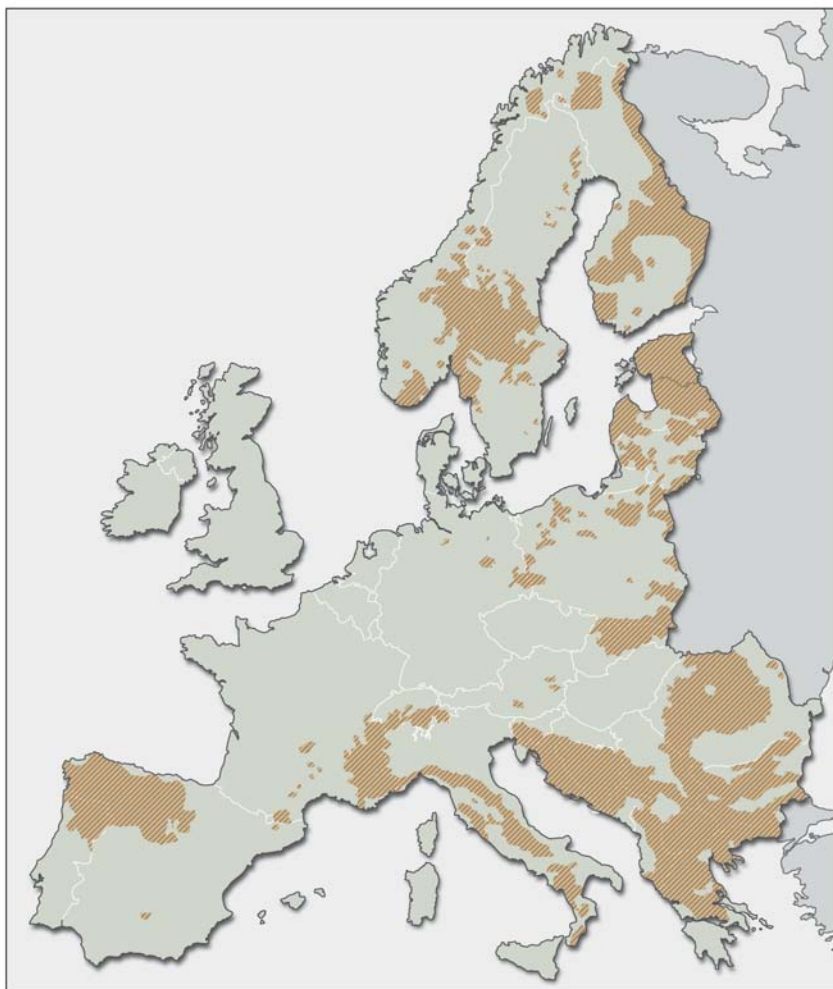
nature et de ses grands prédateurs, ce pays est en train de déployer son *Plan national loup* (2013-2017). À ce propos, la perspective européenne permet de prendre un peu de hauteur quant à la macrofaune hexagonale. La France n'est pas le seul pays européen où des acteurs poussent à réguler fortement les populations lupines. Dans ces pays de cohabitation traditionnelle homme-loup que sont l'Italie et l'Espagne, des conflits accompagnés de braconnage se sont développés dans les régions récemment colonisées par le prédateur.

En Suède, l'opposition est forte en zone rurale, où les populations sont attachées aux activités d'extérieur telles que le ski de fond et la chasse. Par ailleurs, comme les éleveurs français de moutons, les éleveurs lapons apprécient peu les pertes de rennes que leur occasionne le prédateur. Tout cela entraîne un important braconnage. L'intense pression sur les autorités suédoises a rendu possible à la fin de 2009 l'abattage d'une vingtaine de loups par an, afin de limiter la population à 210 individus. Au regard de la fragilité de l'espèce, l'Union européenne menace d'ailleurs régulièrement la Suède d'une procédure d'infraction à la directive *Habitats*. Le cas du loup contredit l'idée répandue que les pays nordiques seraient des modèles écologiques...

Malgré leurs faiblesses, la protection et la gestion du loup en France présentent d'indéniables atouts. Le suivi biologique de l'espèce y a été reconnu d'un niveau de qualité exceptionnellement élevé par une expertise internationale. Grâce à un travail de terrain de l'Office national de la chasse et de la faune sauvage (ONCFS) et à un réseau de correspondants de terrain, de nombreux indices de présence (crottes, poils, carcasses, hurlements, prises de vue automatiques, témoignages visuels) permettent de nourrir une base de données. Grâce aux analyses génétiques et à une modélisation, le *Réseau loup* établit les zones



5. LES POPULATIONS DE CERFS ÉLAPHES se développent en France en raison de l'expansion des forêts et des friches agricoles, et en raison de la gestion cynégétique. Ce phénomène favorise aussi le retour du loup, le principal prédateur du cerf. Si la présence de meutes de loups dans les forêts de plaine se confirme, elle constituera un régulateur naturel du cerf et pourrait avoir des effets positifs sur la végétation forestière et agricole.



6. LES ZONES DE PRÉSENCE DU LOUP EN EUROPE DE L'OUEST sont des régions peu habitées par l'homme. C'est particulièrement vrai en Italie, en Espagne, en France et dans toute l'Europe du Sud, où les loups occupent des massifs montagneux. Cela l'est aussi en Suède, en Finlande et en Allemagne, où le prédateur s'est surtout installé dans des régions forestières faiblement peuplées. Pour autant, cet infatigable explorateur a déjà été aperçu au Danemark, en Hollande, en Champagne...

de présence permanente du loup et stimule les effectifs pour les estimer, ce qui est difficile s'agissant d'une espèce aussi mobile et discrète. À cela s'ajoutent les mesures d'accompagnement de l'élevage les plus abondantes et les mieux organisées d'Europe à l'échelle d'un territoire aussi vaste.

Toutefois, le dynamisme démographique de l'espèce, la pression des chasseurs et des agriculteurs, ainsi que le coût croissant des indemnités ont incité les pouvoirs publics à limiter la progression des effectifs et des territoires du loup. Dès 2004, le statut de protection intégrale du loup a été remis en cause par des autorisations légales de tir, malgré les protestations écologistes. Pourtant, les éliminations d'animaux sont coûteuses et peu efficaces sur le terrain.

L'espèce poursuivant sa reconquête, le nouveau plan français de gestion s'est efforcé de donner les autorisations et les moyens techniques d'éliminer au moins 24 loups en 2013. Les associations de protection du loup (*Ferus*, la Mission loup de *France Nature Environnement*, le WWF) ont critiqué la décision, qu'elles considèrent comme une annonce visant à contenter les éleveurs, mais en ont pris acte. Ce pragmatisme, dû à une confiance dans la volonté officielle de protection du loup, s'oppose à l'attitude de l'Association pour la sauvegarde de la faune sauvage qui a, elle, dénoncé la « trahison » du ministère de l'Écologie, prêt à éliminer dix pour cent de la population lupine estimée.

Malgré ces tentatives pour apaiser le monde agricole, ce dernier exige davan-

tage, particulièrement au niveau local. À cet égard, soulignons un effet paradoxal de la qualité du suivi scientifique français : ce bel effort fait de science et de bonne volonté se retrouve au service d'une politique régulatrice de l'espèce. Les pouvoirs publics voudraient en effet contenir le loup dans les zones actuelles, alors que son mode de colonisation par bonds expose aujourd'hui l'ensemble du territoire français. De fait, les dernières informations attestent qu'après avoir été vu dans les Vosges, *Canis lupus* l'a été en Haute-Saône, en Ardèche, dans le Gers – et il vient de l'être en Champagne...

Faiblesses de gestion

Les faiblesses d'une gestion « politico-émotionnelle » du loup en France apparaissent. Le poids des élus locaux leur permet d'obtenir facilement des préfets des tirs dérogatoires, quitte à ne pas respecter l'esprit des dispositifs nationaux. L'absence de vision prospective nationale accroît l'effet incendiaire de l'apparition du loup.

Pourtant, en 20 ans de présence de *Canis lupus* sur le sol français, de nombreux enseignements ont été tirés et devraient rendre possibles les anticipations souhaitables. Des chercheurs italiens ont publié une modélisation des espaces favorables à la colonisation du loup dans les Alpes et concluent que le massif est très propice au loup. Dans la majorité des massifs français, de telles études manquent. Or le retour d'un grand prédateur peut avoir des conséquences intéressantes sur les écosystèmes. En Amérique du Nord et en Europe de l'Est, plusieurs études montrent ces effets en cascade sur les grands ongulés, sur la végétation et sur quasiment toute la faune d'un territoire. En Europe de l'Ouest, le lancement d'études analogues s'impose.

L'évidence est là : grâce à sa plasticité et au retour à la nature d'espaces de plus en plus grands, le loup poursuivra sa progression en Europe. Ce phénomène n'est pas bien vu de tous. Attirant l'attention des médias et des pouvoirs publics, le prédateur déchaîne les passions, ce qui est une belle illustration du fait que les questions écologiques et les choix sociétaux sont étroitement imbriqués. Les mobilisations actuelles pourraient avoir un double effet : faire du loup... un bouc émissaire et détourner le regard des gens de cette nature qui redevient sauvage... à pas de loup. ■



CHAQUE MOIS



CHAQUE TRIMESTRE

Retrouvez vos magazines en kiosque ou directement chez vous

POUR LA SCIENCE

La référence de l'actualité scientifique internationale



VERSION NUMÉRIQUE
en format PDF



APPLICATION

sur votre smartphone ou tablette



Retrouvez Pour la Science également sur :



WWW.POURLASCIENCE.FR

HISTOIRE DES SCIENCES

Pline l'Ancien et la science des Lumières

Alors qu'elle tombait dans l'oubli avec l'avènement des sciences modernes, l'œuvre naturaliste de Pline a connu un regain de succès inattendu au XVIII^e siècle.

Stéphane Schmitt

Du milieu du XIX^e siècle jusqu'à une époque assez récente, Pline l'Ancien, écrivain romain du I^{er} siècle, auteur d'une monumentale *Naturalis historia* en 37 livres, avait piètre réputation. Outre son style, que les spécialistes de la littérature antique trouvaient trop lourd, les historiens des sciences ou de l'art lui reprochaient de s'être livré à une compilation peu sélective de ses sources, d'y avoir indistinctement puisé des faits scientifiques réels et intéressants (sans toujours bien les comprendre), mais aussi les anecdotes les plus fantaisistes, hommes sans tête ou fourmis géantes amassant de l'or. On le considérait donc comme une mine d'informations incontournable, car unique à beaucoup d'égards, mais peu fiable.

Toutefois, depuis une vingtaine d'années, les historiens reconsidèrent cette opinion. D'une part, il semble que Pline, dans bien des cas, a eu accès à de bonnes sources ; une lecture attentive de son texte livre des données plus sérieuses qu'on ne le pensait. D'autre part, on a montré que, loin d'être crédule, il prenait de la distance à l'égard des faits les plus incroyables, qu'il les mentionnait surtout par souci d'exhaustivité, voire comme des accroches littéraires ou des bornes délimitant un savoir plus sûr. Enfin, les travaux récents ont révélé la cohérence du projet plinien, son lien avec la société de son temps et ses enjeux politiques (voir l'encadré page 74).

Cependant, alors qu'on redécouvre la logique de ce texte, se pose en des termes nouveaux la question de son influence et

de la façon dont il a été perçu au fil des siècles. On pensait que l'intérêt pour Pline avait décliné continûment à partir de la Renaissance, mais l'histoire n'est pas aussi simple. Au XVIII^e siècle, contre toute attente, la *Naturalis historia* de Pline revint sur le devant de la scène scientifique. Les raisons de ce retour sont autant idéologiques et politiques que scientifiques.

L'incomparable succès de la *Naturalis historia*

Contrairement à d'autres grands corpus scientifiques de l'Antiquité (les œuvres d'Aristote ou de Théophraste, par exemple), la *Naturalis historia* n'a pas été oubliée, puis retrouvée plusieurs siècles après. Elle a été transmise, lue, exploitée et citée sans interruption dès sa parution et jusqu'à l'époque contemporaine. Il s'agit même, dans toute la culture occidentale, d'un des ouvrages dont la postérité est la plus riche. Les manuscrits qui nous en sont parvenus comptent parmi les plus répandus pour une œuvre de cette époque et témoignent de sa grande diffusion durant tout le Moyen Âge. Elle était alors l'objet de toutes sortes de versions résumées ou d'extraits limités à un domaine, tel que l'astronomie et surtout la botanique et la pharmacopée. En outre, de même que la *Naturalis historia* était avant tout un ouvrage de compilation (Pline se vantait d'avoir consulté environ 2 000 volumes pour la composer), elle a été pillée par de nombreux auteurs, tels Isidore de Séville ou Albert le Grand. Jusqu'au XV^e siècle, elle est

donc restée une source privilégiée, vivante et massivement exploitée.

À la Renaissance, cependant, son statut se modifie. En redécouvrant certaines sources grecques dont Pline s'était servi (Aristote pour la zoologie, Théophraste pour la botanique) et en les comparant avec le texte de la *Naturalis historia*, les humanistes se rendent compte qu'elles sont souvent plus précises, plus exactes, et que le travail de compilation et de traduction que Pline a effectué n'est pas toujours irréprochable. Certains imputent la faute aux copistes et tentent donc de reconstituer le texte originel de Pline en recourant aux méthodes de la philologie naissante. Mais d'autres estiment que c'est bien Pline lui-même qui a commis des erreurs, et qu'il convient donc de consulter plutôt les auteurs grecs, dont les Latins ne sont que de pâles imitateurs. De là commence à poindre un discours critique à l'égard de la *Naturalis historia*.

Pour autant, le succès de cet ouvrage se poursuit pendant toute la Renaissance, ce dont témoignent les dizaines d'éditions imprimées, complètes ou partielles, en latin ou dans les langues modernes, à partir de la première parue à Venise en 1469. En dépit des faiblesses scientifiques qu'on lui prête, il demeure une source privilégiée, notamment sur les plantes et plus encore sur les animaux. Des auteurs d'ouvrages zoologiques à caractère encyclopédique, tels le naturaliste suisse Conrad Gessner ou le savant italien Ulisse Aldrovandi, lui empruntent une multitude de données. D'ailleurs, les éditions de la *Naturalis historia* parues jusqu'au début du

XVII^e siècle révèlent qu'elle est toujours lue dans une perspective scientifique et en lien avec le savoir moderne. Par exemple, une traduction espagnole de 1624 y intègre en supplément des informations récentes, y compris des illustrations d'animaux du Nouveau Monde, afin d'actualiser la documentation zoologique plinienne.

Enterré par la «révolution scientifique»

La situation change après 1620. Le nombre de nouvelles éditions chute et la place de Pline dans le champ scientifique s'affaiblit. Cela peut se comprendre, compte tenu du contexte intellectuel de ce que l'on a coutume de nommer la «révolution scientifique» : les tendances nouvelles de la science, telles que l'essor de l'expérimentation et de l'empirisme, du mécanisme, des disciplines physico-mathématiques, sont des traits qui s'accordent mal avec le foisonnement un peu désordonné d'un ouvrage tel que la *Naturalis historia*.

Cette dernière connaît donc un réel déclin et tend à passer du domaine des sciences à celui de l'érudition pure. L'une des rares éditions de l'époque, du père Jean Hardouin (1685), marque un progrès sur le plan philologique (elle fera autorité à cet égard jusqu'au XIX^e siècle), mais s'intéresse peu à l'actualité scientifique et fait surtout appel, dans ce domaine, aux commentateurs de la Renaissance. Vers 1700, Pline semble donc exclu de la science contemporaine, qui ne cherche plus guère à dialoguer avec lui.

Or la tendance s'inverse vers le milieu du XVIII^e siècle. Pline suscite alors un net regain d'intérêt des savants. Cette évolution se traduit de différentes façons. En premier lieu, de nouvelles éditions de la *Naturalis historia* voient le jour, entreprises dans une perspective scientifique et destinées à un public intéressé par les sciences. L'une des plus remarquables

1. SUR CETTE MINIATURE d'un manuscrit du XII^e siècle de la *Naturalis historia*, Pline taille sa plume, éclairé par un esclave (en haut). Représenté en chevalier (il fit une carrière militaire), il remet son manuscrit à l'empereur Titus (en bas).



L'AUTEUR



Stéphane SCHMITT est directeur de recherche au laboratoire SPHERE (UMR 7219, CNRS), à l'Université Paris-Diderot.

est l'édition bilingue, franco-latine, publiée en 12 volumes entre 1771 et 1782, par Louis Poinsinet de Sivry, homme de lettres et scientifique amateur : outre le texte lui-même et sa traduction (la première en français depuis la Renaissance), on y trouve un abondant appareil de notes et d'appendices emprunté à la littérature naturaliste récente, notamment à l'*Histoire naturelle* de Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon [1707-1788] pour la partie zoologique. Quand il y a désaccord entre Buffon et Pline, Poinsinet ne tranche pas toujours en faveur du savant moderne. Ainsi s'instaure, à 17 siècles d'écart, via cette édition, un dialogue d'égal à égal entre le naturaliste romain et son successeur.

Au reste, Buffon lui-même place son ouvrage sous le patronage de Pline. Il lui

emprunte son titre et l'épigraphe en tête du premier volume de l'*Histoire naturelle* (1749). Dans l'introduction, Pline fait l'objet d'un éloge, honneur qu'il ne partage guère qu'avec Aristote. « Ce qu'il y a d'étonnant, écrit Buffon, c'est que dans chaque partie Pline est également grand, l'élévation des idées, la noblesse du style relèvent encore sa profonde érudition ; non seulement il savait tout ce qu'on pouvait savoir de son temps, mais il avait cette facilité de penser en grand qui multiplie la science, il avait cette finesse de réflexion de laquelle dépend l'élégance et le goût, et il communique à ses lecteurs une certaine liberté d'esprit, une hardiesse de penser qui est le germe de la philosophie. Son ouvrage tout aussi varié que la nature la peint toujours en beau, c'est, si l'on veut,

La *Naturalis historia*, entre sciences naturelles et politique

Pline l'Ancien dédie son ouvrage au futur empereur Titus, alors héritier du trône, en 77 ou 78, peu de temps avant de périr en tentant d'organiser les secours lors de l'éruption du Vésuve qui ensevelit Pompéi, le 25 août 79. Inédite par son ambition, la *Naturalis historia* a pour objet de traiter de tout ce qui existe dans la nature.

Elle se compose de 37 livres dont le premier comprend, outre une préface dédicatoire, une longue table des matières que Pline, prévoyant que son ouvrage serait plus consulté que lu *in extenso*, a conçue comme une sorte d'index. La succession des livres montre ensuite un mouvement global assez clair, bien que le plan soit perturbé par de multiples digressions.

Pline traite d'abord de l'Univers entier, c'est-à-dire de la cosmologie et des phénomènes météorologiques, géologiques et hydrographiques (livre II), puis il se livre à une description géographique raisonnée des trois continents : Europe, Afrique et Asie (III à VI) ; il aborde ensuite l'être humain dans toutes ses caractéristiques physiologiques, anthropologiques et morales (VII), puis les animaux terrestres (VIII) et aqua-

tiques (IX), les oiseaux (X), les insectes et les parties des animaux (XI).

L'ensemble suivant est consacré aux végétaux : arbres exotiques (XII-XIII), vigne (XIV) et arbres fruitiers (XV), arbres sauvages (XVI), arboriculture et viticulture (XVII), agriculture (XVIII) et plantes potagères (XIX). Reprenant alors à rebours l'ordre précédent, Pline étudie les remèdes tirés de toutes ces plantes (XX-XXVII), puis ceux fournis par l'homme et les animaux (XXVIII-XXXII). Enfin, les derniers livres exposent les matières minérales et leurs utilisations, notamment dans les arts plastiques : métaux (XXXIII-XXXIV), terres et pigments (XXXV), pierres (XXXVI) et gemmes (XXXVII).

L'histoire naturelle selon Pline est donc beaucoup plus vaste que ne le suggère le sens actuel de cette expression : d'une part, elle ne comprend pas seulement les productions individuelles – animaux, végétaux et minéraux –, mais aussi leur cadre général, astronomique et géographique, et tous les phénomènes physiques. D'autre part, la conception qu'a Pline de la nature ne s'oppose pas à la culture, mais ne fait qu'un avec elle. Elle englobe l'homme

lui-même et toutes les activités humaines liées à des objets naturels, telles la pharmacologie, l'agriculture, la métallurgie, la peinture et la sculpture. Enfin, elle se déploie autour de l'homme, plus précisément du citoyen romain : tout est rapporté à Rome et à l'Empire. À cet égard, la *Naturalis historia* revêt une fonction

politique : après les troubles de la fin du règne de Néron et la guerre civile qui s'en est suivie, elle est en quelque sorte une glorification de l'ordre impérial retrouvé sous les auspices de la nouvelle dynastie flavienne. De même que l'homme est le centre de la nature, Rome apparaît comme le centre de l'univers civilisé.



La récolte des parfums. Gravure pour le livre XII de la *Naturalis historia*, dans une édition parue en 1516.

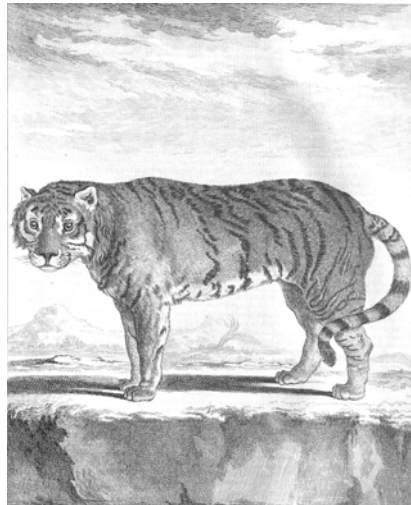
une compilation de tout ce qui avait été écrit avant lui, une copie de tout ce qui avait été fait d'excellent et d'utile à savoir ; mais cette copie a de si grands traits, cette compilation contient des choses rassemblées d'une manière si neuve, qu'elle est préférable à la plupart des ouvrages originaux qui traitent des mêmes matières. »

Non seulement Buffon admire Pline et se compare à lui pour la grandeur du projet et la qualité du style, mais il lui emprunte nombre de données sur les animaux, au point que Pline est l'un des auteurs les plus cités dans l'*Histoire naturelle*. En général, ces informations (physiologiques, biogéographiques, comportementales...) sont crédibles et les faits les plus extravagants ne sont pas retenus (ou cités avec distanciation). Mais Buffon emprunte aussi à Pline des anecdotes plus surprenantes, à la limite de la fable, par exemple quand il décrit la fureur d'une tigresse dont on a ravies les petits – une histoire que l'on retrouve d'ailleurs (avec sa source) dans l'article « Tigre » de l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert.

En phase avec l'idéologie des Lumières

Ainsi, en dépit des progrès indéniables accomplis depuis l'Antiquité dans la connaissance des objets naturels, les savants du XVIII^e siècle restent encore tributaires à bien des égards de données fournies par les Anciens, notamment par Pline. Mais ces emprunts recouvrent des fonctions multiples : outre des données, ils offrent à des auteurs tels que Buffon une occasion d'ancrer leur discours dans une tradition littéraire de lieux communs sur les animaux et, partant, de s'adresser à un public qui dépasse les milieux savants.

Les causes du succès de Pline au XVIII^e siècle sont complexes. Certaines tendances de cette époque, par opposition au siècle précédent, ont joué un rôle majeur : l'essor de l'encyclopédisme, le goût renouvelé pour l'histoire naturelle (par rapport aux disciplines physico-mathématiques), l'implication dans la pratique scientifique d'une part plus large de la société, tous ces aspects rapprochent le projet et le style pliniens du contexte des Lumières.



2. LE TIGRE, planche extraite du volume IX de l'*Histoire naturelle* de Buffon, publié en 1761. Au sujet de cet animal, comme pour de nombreuses autres espèces, Buffon emprunte à Pline un grand nombre de données scientifiques, ainsi que des lieux communs à valeur plus littéraire.

À ÉCOUTER

Le jeudi 16 janvier 2014, de 14h à 15h, Stéphane Schmitt reviendra sur l'histoire de l'œuvre naturaliste de Pline l'Ancien dans l'émission *La marche des sciences*, sur France Culture, www.franceculture.com

BIBLIOGRAPHIE

J. Loveland et S. Schmitt, *Poinsinet's edition of the Naturalis Historia and the revival of Pliny in the sciences of the Enlightenment*, *Annals of Science*, à paraître, 2014.

Pline l'Ancien, *Histoire naturelle*, éd. S. Schmitt, Gallimard, 2013.

Par ailleurs, la dimension politique de la *Naturalis historia* est dans l'air du temps : au siècle des Lumières, les sciences prennent une importance économique et idéologique considérable, notamment dans la valorisation des ressources naturelles et l'exploitation par les puissances européennes de leurs empires coloniaux. Or Pline consacre toute une partie de son ouvrage aux activités humaines utiles réalisées sur des objets naturels (voir l'encadré page ci-contre). Cette place que Pline a réservée aux activités humaines, ainsi que sa glorification de l'empire romain, entrent en résonance avec ce nouveau positionnement de l'homme dans la nature.

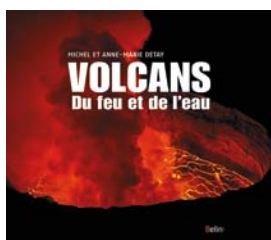
De plus, comme d'autres auteurs anciens, Pline a pu être instrumentalisé dans des débats particuliers aux Lumières. Par exemple, Poinsinet, peu favorable à Buffon et à l'*Encyclopédie*, tend à présenter la *Naturalis historia* comme une encyclopédie réussie, contrairement à ses imitations modernes. De même, en vantant les qualités de Pline et d'Aristote, Buffon dénigre par contraste toutes les traditions plus récentes de l'histoire naturelle dont il tient à se démarquer, spécialement la classification du vivant proposée depuis 1735 par le botaniste suédois Carl von Linné. Ainsi, si les savants de l'Antiquité constituent bien des sources d'inspiration et d'informations, leur exemple revêt une puissance rhétorique largement exploitée dans le cadre des tensions agitant les sciences de la nature dans la seconde moitié du XVIII^e siècle.

La situation se renverse de nouveau au début du XIX^e siècle. Alors que progresse la spécialisation dans les sciences, que les données nouvelles sur les objets naturels s'accumulent, que l'écriture compilatoire et encyclopédique n'est plus jugée digne des vrais savants, Pline est peu à peu exclu du domaine scientifique et abandonné aux philologues, aux historiens et aux spécialistes de l'Antiquité, un statut qui est encore le sien aujourd'hui. Il n'en demeure pas moins remarquable que, jusqu'au début de l'époque contemporaine et à contre-courant d'un déclin qui s'amorçait à la fin de la Renaissance, il a conservé une place de choix et une incontestable actualité dans les sciences de la nature. ■

La sélection de livres

■ POUR LA SCIENCE

Ce mois-ci, partez à la découverte des volcans, des pierres ainsi que des minéraux et plongez dans l'histoire des requins ou encore des dinosaures.



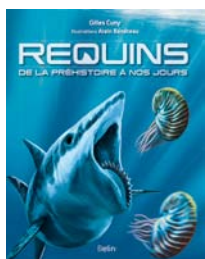
Volcans *Du feu et de l'eau*

Michel et Anne-Marie Detay

Réf. 70117561

Après avoir arpenté la planète sur les traces des volcans actifs ou éteints, les auteurs livrent dans ce bel ouvrage, illustré de magnifiques photos, une vision moderne et originale du volcanisme, autour de l'alliance de l'eau et du feu. Car l'eau est aussi au cœur de l'activité volcanique !

Editions Belin 2013 – 192 pages – 30 euros – ISBN 978-2-7011-7561-4



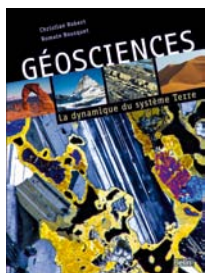
Requins *De la préhistoire à nos jours*

Gilles Cuny, illustrations de Alain Beneteau

Réf. 70115423

Les requins ? Ils sont presque à égalité avec les dinosaures dans l'imaginaire collectif. Une histoire qui conduit à découvrir des monstres du passé, à la morphologie invraisemblable, illustrée de près de 200 reconstitutions et photographies. Un livre facile à lire, écrit par LE spécialiste français des requins, riche en informations scientifiques, en sensations et en surprises.

Editions Belin 2013 – 224 pages – 27,90 euros – ISBN 978-2-7011-5423-7



Géosciences *La dynamique du système Terre*

Christian Robert, Romain Bousquet

Réf. 70113816

Premier ouvrage de référence sur les géosciences publié en couleurs et en français, avec plus de 800 illustrations, cet ouvrage unique couvre en un seul volume l'intégralité des thématiques associées aux géosciences. Il présente une vision globale et cohérente du système Terre, depuis la formation de notre planète au sein de l'Univers et du système solaire, jusqu'à son état actuel.

Editions Belin 2013 – 1160 pages – 68 euros – ISBN 978-2-7011-3816-9

Secrets d'épaves

Anne et Jean-Pierre Joncheray

Réf. 70117534



Les deux auteurs, archéologues, ont consacré leur vie aux épaves, à leur recherche et leur fouille. Ce livre détaille 25 épaves emblématiques s'échelonnant des temps préhistoriques à la Seconde Guerre mondiale, de la grotte Cosquer au mythique Lightning de Saint Exupéry. Plongez dans des siècles d'histoire sous-marine !

Editions Belin – 240 pages en coul., 39,50 euros – ISBN 978-2-7011-7534-8

Séismes et volcans

Elisa Brune et Monica Rotaru

Réf. 74650355*



Pour comprendre ce qui se passe à l'intérieur de la Terre, rien de mieux que trembler, éternuer et rugir avec elle ! Cet ouvrage fait le pari de vous faire percevoir les mécanismes internes de la Terre, aussi lents et imperceptibles soient-ils. Préparez-vous à une visite d'anthologie où l'émerveillement et la connaissance se marieront dans un grand feu d'artifice !

Editions Le Pommier – 244 pages 30 euros – ISBN 978-2-7465-0355-7

Les Premières sépultures

Bruno Maureille

Réf. 74650674*



L'homme entretient avec la mort une relation très ancienne. Les restes fossiles humains exhumés lors de fouilles témoignent de pratiques funéraires très variées, qui peuvent être analysées selon des critères biologiques ou culturels.

Editions Le Pommier 2013 – 192 pages 10 euros – ISBN 978-2-7465-0674-9

En partenariat avec les éditeurs

Belin:
ÉDITEUR INDÉPENDANT
DEPUIS 1777

Le Pommier

Pour commander ces ouvrages www.pourlascience.fr/librairie *

ou en renvoyant le bon de commande ci-contre.

* Pour commander les titres édités par Le Pommier : www.editions-belin.fr

Réf. 84245102

Claude Allègre et René Bernier

La géologie

Passé, présent et avenir de la Terre

Éditions Belin/Pour la Science 2009
304 pages – 36,05 euros
ISBN 978-2-8424-5102-8

Réf. 84245001

Maurice Maftan

Ce que disent
les pierres



Le Livre de Poésie

Éditions Belin/Pour la Science 1998
144 pages – 17,25 euros
ISBN 978-2-8424-5001-4

Réf. 70114729

dans le système solaire, aux
 confins de l'Univers, dans le
 tréfonds de notre planète, les
 auteurs nous invitent à écouter le
 message des minéraux. Un livre

Éditions Belin/Pour la Science 2008
160 pages – 23,85 euros
ISBN 978-2-7011-4729-1

Réf. 74650708*

Éditions Le Pommier 2013 – 224 pages
69 euros – ISBN 978-2-7465-0451-6

Réf. 70114206

Éditions Belin – 208 pages,
25,90 euros – ISBN 978-2-7011-4206-7

Réf. 70114081

Éditions Belin 2005 – 256 pages
21,85 euros – ISBN 978-2-7011-4081-0



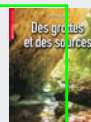
Rémy Lestienne

Réf. 74650636*
Éditions le Pommier 2013
192 pages – 10 euros
ISBN 978-2-7465-0636-7



Réf. 84245077

Éditions Belin/Pour la Science 2005
168 pages – 20,30 euros
ISBN 978-2-8424-5077-9

**Réf. 74650678***

Éditions Le Pommier 2013
192 pages – 10 euros
ISBN 978-2-7465-0678-7



Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil
Tél : 0 805 655 255 • e-mail : pourdascience@daudin.fr

la sélection de *Pour la Science*. Je reporte les titres, prix et références à 8 chiffres correspondant aux ouvrages choisis :

Titre	Réf.	Prix
		€
		€
		€
		€
		€
		€
Frais de port (4,90 € France – 12 € étranger)	+	€
Total à régler	=	€

Adresse:

Ville :

Tél.*

E-mail*:

@

*pour recevoir la newsletter *Pour la Science* [à remplir en majuscules]

☐ par carte bancaire

Numéro	Contenu
1	...
2	...
3	...
4	...
5	...
6	...
7	...
8	...
9	...
10	...
11	...
12	...
13	...
14	...
15	...
16	...
17	...
18	...
19	...
20	...
21	...
22	...
23	...
24	...
25	...
26	...
27	...
28	...
29	...
30	...
31	...
32	...
33	...
34	...
35	...
36	...
37	...
38	...
39	...
40	...
41	...
42	...
43	...
44	...
45	...
46	...
47	...
48	...
49	...
50	...
51	...
52	...
53	...
54	...
55	...
56	...
57	...
58	...
59	...
60	...
61	...
62	...
63	...
64	...
65	...
66	...
67	...
68	...
69	...
70	...
71	...
72	...
73	...
74	...
75	...
76	...
77	...
78	...
79	...
80	...
81	...
82	...
83	...
84	...
85	...
86	...
87	...
88	...
89	...
90	...
91	...
92	...
93	...
94	...
95	...
96	...
97	...
98	...
99	...
100	...

Date d'expiration

Cryptogramme

Signature obligatoire

Tous ces livres sont également disponibles en librairie.

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

LOGIQUE & CALCUL

Le dilemme du prisonnier et l'illusion de l'extorsion

Dans sa version itérée, le dilemme du prisonnier est un jeu qui aide à comprendre diverses situations sociales et stratégiques. Une controverse autour des stratégies d'extorsion a enrichi le débat.

Jean-Paul DELAHAYE

Le dilemme itéré du prisonnier est un jeu qui éclaire les comportements sociaux d'entités en concurrence sur un même terrain : organismes vivants se partageant une niche écologique, entreprises concurrentes se disputant un marché, personnes s'interrogeant sur l'intérêt de mener un travail en commun. Bien que le dilemme itéré du prisonnier soit fondé sur une simplification extrême, son étude mathématique reste difficile, et souvent seules les simulations réussissent à trancher les questions posées.

Cependant, un article paru en 2012 dans les Actes de l'Académie américaine des sciences, signé par le célèbre physicien de Princeton Freeman Dyson et par William Press de l'Université du Texas, a mis en évidence une famille de stratégies passées inaperçues. Les chercheurs démontraient mathématiquement certaines propriétés étonnantes de leurs « ZD-stratégies ». Celles-ci semblent capables d'imposer leur loi au jeu du dilemme itéré du prisonnier en pratiquant une forme d'extorsion. Cela étonna les spécialistes qui pensaient qu'aucune stratégie n'était « absolument » meilleure.

Le dilemme du prisonnier est celui auquel sont soumis deux agents ayant le choix entre coopérer (c) et trahir (t) et qui sont rétribués par R points chacun s'ils jouent tous deux c (coopère), par P points si chacun joue t (trahit), et qui reçoivent

respectivement T et S points si l'un joue t et l'autre c. On peut résumer ces règles par : $[c, c] \rightarrow R+R$, $[t, t] \rightarrow P+P$, $[t, c] \rightarrow T+S$. On impose $T > R > P > S$ et on choisit souvent les valeurs : $T=5$, $R=3$, $P=1$, $S=0$, qui donnent : $[c, c] \rightarrow 3+3$, $[t, t] \rightarrow 1+1$, $[t, c] \rightarrow 5+0$.

Trahir ou coopérer ?

L'expression « dilemme du prisonnier » provient de l'histoire imaginaire de deux suspects arrêtés devant une banque auxquels un interrogateur essaie de faire avouer séparément qu'ils étaient sur le point de mener une attaque. Si l'un avoue, c'est-à-dire trahit son compère, et l'autre non, c'est-à-dire poursuit la coopération avec son compère [situation $[t, c]$], celui qui a avoué est libéré (rétribution de cinq années de liberté), celui qui n'a pas avoué va en prison cinq ans (maximum prévu pour une attaque de banque). Si les deux compères restent solidaires, $[c, c]$, ils vont deux ans en prison chacun pour port illégal d'arme (rétribution de trois années de liberté par rapport aux cinq ans du pire cas). Si les deux bandits se trahissent simultanément, c'est-à-dire avouent, $[t, t]$, ils font chacun quatre ans de prison (rétribution d'une année de liberté par rapport au pire cas en récompense de leurs aveux).

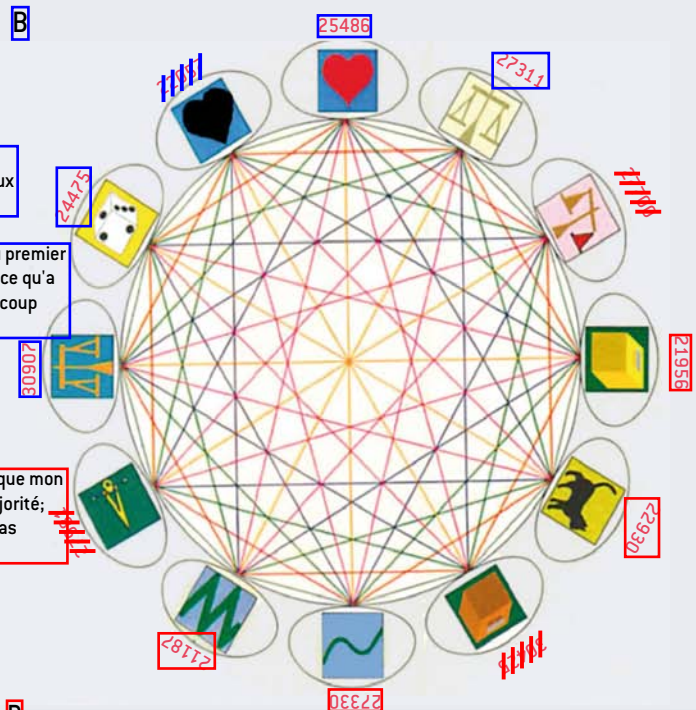
Dans cette situation, la trahison est logique : elle conduit toujours à un meilleur résultat que la coopération. En effet, si l'autre entité coopère, j'obtiens 5 points en

1. LES STRATÉGIES CLASSIQUES (A) et les gains obtenus (B et D) dans un tournoi où chacune rencontre pendant 1 000 coups chaque stratégie, y compris elle-même, calculés sur la base des points accordés à chaque coup (C). En totalisant les gains, on voit que les stratégies agressives sont mal classées. La stratégie *Méchante*, qui gagne ou fait jeu égal contre toute autre stratégie, est ainsi 10^e sur 12. La stratégie *Donnant-donnant*, qui perd ou fait jeu égal contre toute autre, gagne pourtant le tournoi... car elle incite à la coopération.

Dans une simulation de l'évolution (E), les stratégies gagnant le plus de points sont celles qui ont le plus de descendants d'une génération à la suivante. On constate une convergence vers la coopération généralisée, et toutes les stratégies prenant l'initiative de trahir se font éliminer. Au bout de 30 générations, il ne reste que *Donnant-donnant*, *MajoMau*, *Rancunière*, *Donnant-donnant-dur*, *Gentille* dont les effectifs sont stables. Même les stratégies *Sondeur* et *Périodique-cct*, dont l'agressivité est pourtant modérée, sont éliminées.

Aux 12 stratégies précédentes, on ajoute les deux stratégies *Pavlov* (souvent aussi bonne que *Donnant-donnant*) et *Graduelle* définies dans le texte (F). *Graduelle* arrive en tête : avoir de la mémoire est utile ! D'autres tests ont confirmé que *Graduelle* est supérieure à *Donnant-donnant* : face aux stratégies agressives sans mémoire (*Lunatique*, *Périodique-cct*, etc.), *Graduelle* tend à avoir le comportement optimal qui est de toujours jouer t, alors que ce n'est pas le cas de *Donnant-donnant*.

- A**
- 1. Donnant-donnant :**
je coopère au premier coup, puis je joue ce qu'a joué mon adversaire au coup précédent.
 - 2. MajoMou :** je joue ce que mon adversaire a joué en majorité ; au premier coup ou en cas d'égalité, je coopère.
 - 3. Rancunière :**
je coopère, mais dès que mon adversaire a trahi, je trahis toujours.
 - 4. Sondeur :** aux 3 premiers coups je joue tcc ; à partir du coup 4, si aux coups 2 et 3 mon adversaire a coopéré, je trahis toujours, sinon je joue *Donnant-donnant*.
 - 5. Périodique-cct :** je joue périodiquement cct.
 - 6. Donnant-donnant-dur :** je coopère sauf si mon adversaire a trahi l'un des deux coups précédents.
 - 7. Gentille :**
je coopère toujours.
 - 8. Lunatique :**
je trahis une fois sur deux au hasard.
 - 9. Méfiante :** je trahis au premier coup, puis après je joue ce qu'a joué mon adversaire au coup précédent.
 - 10. Méchante :**
je trahis toujours.
 - 11. MajoDur :** je joue ce que mon adversaire a joué en majorité ; au premier coup ou en cas d'égalité, je trahis.
 - 12. Périodique-ttc :**
je joue périodiquement ttc.

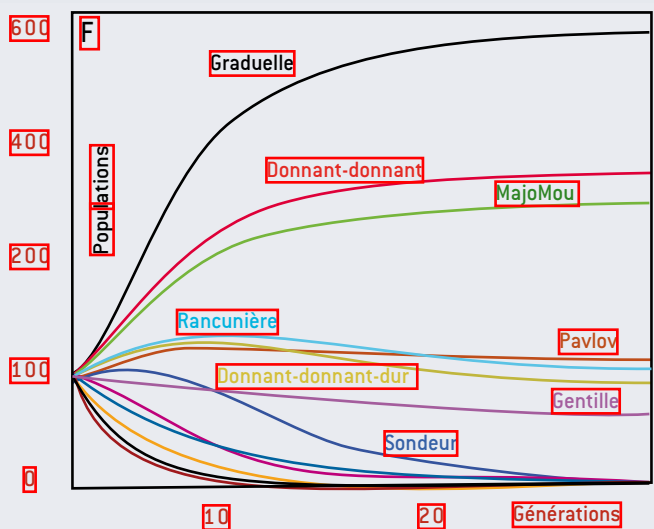
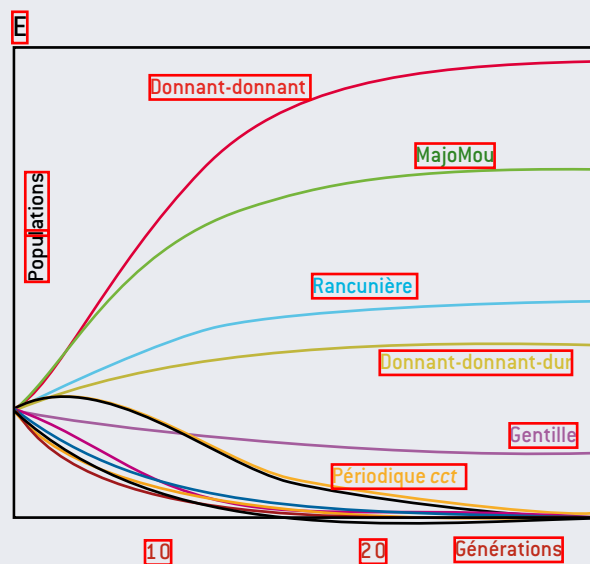


C

Gain du Joueur 1	Gain du Joueur 2	
	Coopère (C)	Trahit (C)
Coopère (C)	3 / 3	5 / 0
Trahit (T)	0 / 5	1 / 1

D

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3000	3000	3000	2999	2667	3000	3000	2244	2500	999	2500	1998
2	3000	3000	3000	2999	2001	3000	3000	2095	2500	999	2500	2331
3	3000	3000	3000	1002	2666	3000	3000	2925	1003	999	1003	2331
4	2999	2999	1002	1004	2666	1005	4996	2541	2995	998	2496	1996
5	2667	2666	2666	2666	2666	1671	3666	1994	2666	333	1663	1661
6	3000	3000	3000	1010	3331	3000	3000	2634	1003	999	1003	2331
7	3000	3000	3000	1	2003	3000	3000	1466	2997	1	2997	889
8	2244	2645	512	1601	2634	1401	4009	2245	2252	491	2567	1670
9	2500	2500	1003	3000	2666	1003	3002	2254	1000	1000	1000	1999
10	1004	1004	1004	1008	3666	1004	5000	3033	1000	1000	1000	2332
11	2500	2500	1003	2501	2003	1003	3002	2112	1000	1000	1000	2332
12	2003	871	871	2006	3335	871	4334	2497	1999	567	567	1666



jouant t mais seulement 3 points en jouant c ; si l'autre entité trahit, j'obtiens 1 point en jouant t, et 0 en jouant c.

Il y a dilemme. Collectivement, les deux agents emportent 6 points en jouant [c, c] alors qu'ils en remportent moins en jouant [c, t] et encore moins en jouant [t, t]. L'intérêt collectif est que chacun joue c, mais une analyse logique individuelle conduit inévitablement à [t, t], qui est collectivement le pire cas !

Le dilemme est itéré quand la situation de choix entre c et t se présente périodiquement aux deux mêmes agents. Jouer consiste alors à choisir une stratégie qui, informée du comportement antérieur de l'adversaire, indique le coup suivant à jouer.

Donnant-donnant, une bonne stratégie

La stratégie *Donnant-donnant* consiste à jouer c au premier coup, puis à jouer au coup n ce que l'adversaire a joué au coup n - 1. La stratégie *Périodique-ttc* consiste à jouer t, puis t, puis c, et à recommencer indéfiniment la même séquence des trois coups. Lorsque *Donnant-donnant* rencontre *Périodique-ttc*, la confrontation donne la suite : [c, t] [t, t] [t, c] [c, t] [t, t] [t, c] [c, t] [t, t] [t, c]... Cela rapporte donc en moyenne $(0 + 1 + 5)/3 = 2$ points par coup à *Donnant-donnant* et $(5 + 1 + 0)/3 = 2$ points aussi par coup à *Périodique-ttc*.

Dans certaines stratégies, les coups sont décidés au hasard. La stratégie *Lunatique* joue par exemple c dans 50 % des coups et t dans 50 % des coups en tirant au hasard avec une pièce de monnaie. Un petit calcul montre que *Lunatique* opposée à *Donnant-donnant* gagne en moyenne $9/4 = 2,25$ points par coup, ce que gagne aussi son adversaire.

Un raisonnement élémentaire montre d'une part que *Donnant-donnant* ne perd jamais plus de 5 points, quel que soit son adversaire et la durée de la rencontre, et d'autre part qu'il ne fait jamais mieux que lui. Dans un tournoi entre un ensemble varié de stratégies (chacune joue contre chaque autre, y compris elle-même, et on totalise les points gagnés), Robert Axelrod a montré que *Donnant-donnant* était une bonne

stratégie. Elle ne gagne pas toujours, car certains ensembles de stratégies lui sont défavorables, mais elle se retrouve le plus souvent classée parmi les premières. Elle ne bat jamais personne, mais comme son comportement incite à la coopération, elle obtient de bons scores qui la placent dans le peloton de tête (voir la figure 1).

Deux autres stratégies sont aussi intéressantes que *Donnant-donnant* :

- *Pavlov* : au premier coup, je coopère ; ensuite, si au dernier coup joué, j'ai gagné 3 points ou plus, je rejoue la même chose, sinon je change.

- *Graduelle* : je coopère au premier coup ; ensuite, lorsque mon adversaire me trahit, je le punis au coup suivant (comme *Donnant-donnant* qui répond à une trahison au coup n - 1 par une trahison au coup n), mais je suis plus sévère que *Donnant-donnant*, car je punis mon adversaire en jouant t pendant k coups consécutifs, où k est le nombre de trahisons passées de mon adversaire (mes punitions sont donc « graduelles »). Après une telle phase de rétorsion, je coopère deux fois de suite pour tenter de rétablir la paix.

La stratégie *Graduelle* a été conçue en 1993 par C. Dziengelewski, un lecteur de *Pour la Science* qui participait à un concours organisé par la revue. Le concours a suggéré qu'il n'y a pas de limite à la qualité des stratégies, à condition de les rendre de plus en plus complexes. D'autres études menées depuis, en particulier par Bruno Beaufils du Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille conduisent aux conclusions suivantes, généralement acceptées :

- Il n'y a pas de stratégies meilleures que toutes les autres, mais certaines sont mauvaises dans pratiquement tous les environnements possibles, alors que d'autres sont bonnes dans des tournois variés.

- Les bonnes stratégies sont réactives : elles répondent quand on les trahit, prennent le risque de coopérer, commencent par coopérer et, face à un adversaire qui coopère, elles ne trahissent pas, elles savent être indulgentes, après une trahison de l'adversaire elles finissent par pardonner pour renouer la coopération (comme *Graduelle*).

À côté de l'évaluation des stratégies obtenues par des tournois, il existe des

méthodes de tests plus subtiles auxquelles ne réussissent que les stratégies très robustes. Les « sélections écologiques » sont l'une de ces méthodes. On met plusieurs exemplaires de chaque stratégie à tester dans une arène virtuelle et on y organise un tournoi. En fonction des points gagnés lors de ce tournoi, on fait évoluer les effectifs de chacune des stratégies, ce qui définit une seconde génération. La seconde génération produit selon le même processus une autre génération, etc. Les stratégies gagnantes (celles dont les effectifs sont les plus importants) lors d'une telle évolution sont bonnes dans des arènes variables, leurs bons classements ont donc une signification plus profonde que celui donné par un simple tournoi.

Les résultats obtenus par ces calculs modélisent la sélection naturelle et conduisent à une conclusion étonnante : sauf dans des cas très rares, l'arène finit par n'être occupée que par des stratégies qui ne prennent jamais l'initiative de trahir (c'est le cas de *Donnant-donnant*, de *Graduelle* et de *Pavlov*). Après quelques générations, l'arène est occupée par des stratégies qui ne jouent entre elles que des coups [c, c], donc dans un état de coopération généralisée. Le phénomène est frappant : bien qu'il n'y ait pas d'autorité de contrôle et que la tentation de la trahison soit présente pour tous à chaque coup joué, l'évolution élimine toutes les stratégies qui succombent à cette tentation.

Des résultats qui changent la donne ?

L'article de William Press et Freeman Dyson qui a tant étonné les spécialistes en 2012 a un titre provocateur : « Dans le dilemme itéré du prisonnier, il existe des stratégies qui dominent tout adversaire évolutif ». Il a fait sursauter les chercheurs qui pensaient que l'accord sur l'idée d'une convergence vers la coopération généralisée interdisait qu'il puisse exister des stratégies dominantes (donc exploitant les autres), d'autant plus que les stratégies mises en avant par W. Press et F. Dyson ne respectent pas la règle qu'on pensait définitive : il ne faut jamais prendre l'initiative de trahir face

2. Les ZD-stratégies

Une stratégie à mémoire d'un coup est définie par les probabilités p_1, p_2, p_3, p_4 de jouer c lorsque le dernier coup a été respectivement $[c, c], [c, t], [t, c]$ ou $[t, t]$. Notons $Strat(p_1, p_2, p_3, p_4)$ cette stratégie. W. Press et F. Dyson considèrent une classe de stratégies $Strat(p_1, p_2, p_3, p_4)$ dépendant de trois paramètres a, b et c , nommées ZD-stratégies et notées $ZD(a, b, c)$. Les équations générales reliant les paramètres p_1, p_2, p_3, p_4 pour les ZD dans le cas $\{R=3, S=0, T=5, P=1\}$ sont :

$$\begin{aligned} p_1 - 1 &= 3a + 3b + c; \\ p_2 - 1 &= 5b + c; \\ p_3 &= 5a + c; \\ p_4 &= a + b + c. \end{aligned}$$

W. Press et F. Dyson démontrent que

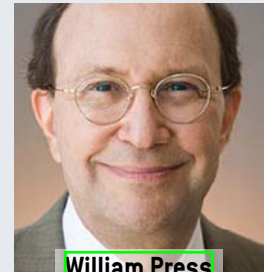
lorsqu'on oppose $ZD(a, b, c)$ à une stratégie $Strat$, et que l'on note G_1 le gain moyen par coup de la première et G_2 le gain moyen par coup de la seconde, alors ces gains moyens vérifient : $aG_1 + bG_2 + c = 0$. Le gain moyen G_2 ne dépend plus de ce que $Strat$ joue ! La stratégie $Strat$ est « contrôlée » par la ZD-stratégie.

Lorsque $a = 0$ et $b \neq 0$, on a : $p_1 = 3b + c + 1, p_2 = 5b + c + 1, p_3 = c, p_4 = b + c$ et $G_2 = -c/b$. Autrement dit, $Strat$ a un gain moyen indépendant des probabilités qui la définissent, gain qui ne dépend que de la ZD-stratégie qui lui fait face, $ZD(a, b, c)$. Une telle ZD-stratégie est nommée *Égaliseur*.

Prenons un exemple d'*Égaliseur* : $a = 0; b = -1/3; c = 2/3$:

$p_1 = 2/3; p_2 = 0; p_3 = 2/3; p_4 = 1/3$; $G_2 = -cb = 2$. Voici les résultats des rencontres entre cet *Égaliseur* et diverses stratégies classiques :
 $\text{Égaliseur} = 2,5 \leftrightarrow \text{Donnant-donnant} = 2$
 $\text{Égaliseur} = 3 \leftrightarrow \text{Graduelle} = 2$
 $\text{Égaliseur} = 3 \leftrightarrow \text{Gentille} = 2$
 $\text{Égaliseur} = 1 \leftrightarrow \text{Méchante} = 2$
 $\text{Égaliseur} = 2 \leftrightarrow \text{Périodique-cct} = 2$
 $\text{Égaliseur} = 1 \leftrightarrow \text{Rancunière} = 2$
 $\text{Égaliseur} = 2 \leftrightarrow \text{Égaliseur} = 2$

Égaliseur force le gain moyen de l'adversaire, mais cela se fait parfois à ses dépens : contre *Rancunière*, elle n'obtient qu'un point en moyenne par coup et comme *Égaliseur* force les stratégies rencontrées à avoir un faible score, elle en est victime lorsqu'elle joue contre elle-même !



William Press



Freeman Dyson

à un adversaire qui coopère. Pire encore, l'article présentait comme les meilleures possibles des stratégies simples (n'utilisant, pour se déterminer, que le dernier coup joué), ce qui est en contradiction avec l'idée d'un perfectionnement possible illimité des stratégies de plus en plus complexes.

L'étonnement était d'autant plus grand que les résultats avancés étaient des preuves mathématiques dans un domaine où il est difficile de démontrer des résultats, la raison étant que l'espace associé au problème est infini et discret. Il s'agit de l'espace de tous les algorithmes pouvant servir de stratégie, espace qui n'est muni d'aucune structure topologique en lien direct avec les performances des stratégies. Les méthodes habituelles fondées sur le continu ne donnent rien et la richesse énorme de l'espace des stratégies envisageables ne se laisse pas réduire à quelques équations ou considérations logiques. Les résultats de W. Press et F. Dyson remettaient en cause les innombrables conclusions admises et utilisées en théorie de l'évolution, en économie et en sciences sociales.

Le travail de W. Press et F. Dyson s'organise autour de deux arguments tirés de

théorèmes. Le premier théorème concerne le dilemme itéré dans une version limitée aux stratégies probabilistes à mémoire d'un coup : les stratégies *Lunatique*, *Donnant-donnant* et *Pavlov* appartiennent à cette catégorie, mais pas la stratégie *Graduelle* qui consulte tous les coups déjà joués.

Stratégies probabilistes à mémoire d'un coup

Une stratégie à mémoire d'un coup est définie par quatre paramètres p_1, p_2, p_3, p_4 indiquant la probabilité de jouer c lorsque le dernier coup a été $[c, c], [c, t], [t, c]$ ou $[t, t]$. Notons $Strat(p_1, p_2, p_3, p_4)$ cette stratégie générale (on supposera que la stratégie coopère au premier coup).

La stratégie *Donnant-donnant* est $Strat(1, 0, 1, 0)$: elle coopère avec une probabilité de 100 % si le dernier coup est $[c, c]$ ou $[t, c]$, et trahit sinon. De même, on vérifie sans peine que la stratégie *Lunatique* est $Strat(1/2, 1/2, 1/2, 1/2)$ et que *Pavlov* est $Strat(1, 0, 0, 1)$.

W. Press et F. Dyson considèrent une classe particulière des stratégies $Strat(p_1, p_2, p_3, p_4)$ dépendant de trois

paramètres a, b et c et dénommées ZD-stratégies. Nous les noterons $ZD(a, b, c)$ (voir la figure 2). Le ZD provient d'un déterminant nul (zero determinant) qui apparaît dans les raisonnements conduisant aux théorèmes.

Le plus important est que les deux chercheurs démontrent qu'elles ont la propriété d'avoir un gain moyen lié linéairement à celui de leur adversaire quand celui-ci est pris parmi les stratégies à mémoire d'un coup. Ainsi, quand on oppose $ZD(a, b, c)$ à une stratégie $Strat$ et qu'on note G_1 le gain moyen par coup de la première et G_2 le gain moyen par coup de la seconde, ces gains moyens vérifient $aG_1 + bG_2 + c = 0$.

Si $a = 0$ et $b \neq 0$, on a $G_2 = -c/b$: $Strat$ a un gain moyen indépendant des probabilités qui la définissent, gain qui ne dépend que de la ZD-stratégie qui lui fait face, $ZD(0, b, c)$! Une telle ZD-stratégie est nommée *Égaliseur*. Contre elle, toutes les stratégies à mémoire d'un coup obtiennent le même gain moyen connu d'avance : $-c/b$. Inutile de se débattre face à une stratégie *Égaliseur*, vous gagnerez $-c/b$ et pas plus ! Les valeurs possibles pour $-c/b$ sont les valeurs situées entre P et R (c'est-à-dire entre 1 et 3 dans le cas classique).

3. Les extorqueurs

Parmi les ZD-stratégies découvertes par W. Press et F. Dyson certaines opèrent une forme d'extorsion. En effet, si $c = -(a+b)P$, on démontre que le gain moyen G_1 de la stratégie ZD contre une autre (laquelle obtient le gain moyen de G_2) vérifie : $G_1 - P = X(G_2 - P)$ avec $X = -b/a$. En

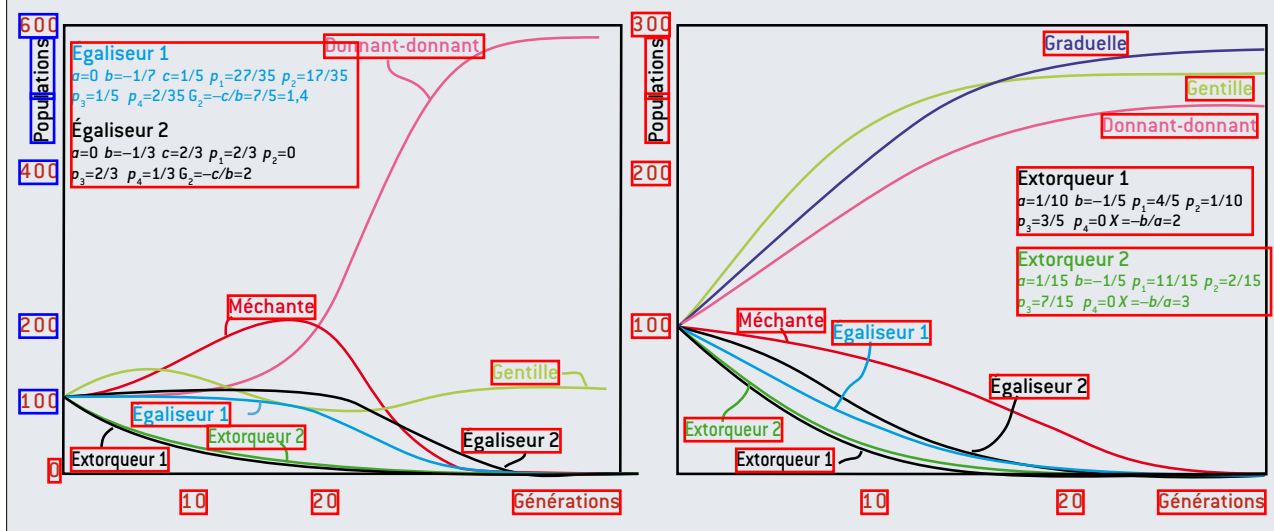
clair, si la seconde veut gagner plus, donc augmenter $(G_2 - P)$, cela entraîne mécaniquement que la stratégie ZD augmente son gain moyen, dont l'écart à P est toujours X fois l'écart à P du gain de la seconde.

Les quatre paramètres définissant ces stratégies *Extorqueurs* sont donnés

par les équations : $p_1 = 2a + 2b + 1$; $p_2 = 4b - a + 1$; $p_3 = 4a - b$; $p_4 = 0$.

Prenons deux stratégies *Extorqueurs* de cette catégorie, deux stratégies *Égaliseurs* dont les paramètres sont donnés ci-dessous et regardons leurs évolutions avec les stratégies classiques, dans un cas sans *Graduelle*

et dans l'autre cas avec. Un des gros défauts des stratégies *Extorqueurs* est qu'elles jouent mal contre elles-mêmes et contre n'importe quelle autre stratégie *Extorqueur*. Dans la simulation évolutive, les *Égaliseurs* et les *Extorqueurs* ne subsistent pas et *Graduelle* prend la première place.



La stratégie ZD[0, -1/3, 2/3] (voir la figure 2) qui est Strat[2/3, 0, 2/3, 1/3] force le gain moyen de son adversaire, qui sera de 2 points en moyenne par coup, quelle que soit la stratégie à mémoire d'un coup prise par l'adversaire. Il y a mieux encore : les ZD-stratégies dénommées *X-Extorqueur*.

Elles ne vous permettent d'avoir un bon résultat que si vous leur en accordez un proportionnellement meilleur. Ce sont celles où $c = -(a+b)P$. En jouant contre elle, la relation entre votre gain moyen G_2 et le sien G_1 est $G_1 - P = X(G_2 - P)$, où $X = -b/a$.

Cela signifie que ce qu'elles gagnent en moyenne en plus de P (pris égal à 1 dans le cas usuel) est proportionnel à ce que leur adversaire gagne en moyenne en plus de P . Si vous jouez contre un *X-Extorqueur*, vous ne pouvez améliorer votre score moyen qu'en améliorant le sien : il vous taxe en proportion X de vos revenus !

Considérons ZD[1/10, -1/5, 1/10] (*Extorqueur 1* de la figure 3) qui est la stratégie Strat[4/5, 1/10, 3/5, 0]. C'est

une stratégie 2-*Extorqueur* : elle double pour elle l'écart à P . Par exemple, quand elle joue contre *Pavlov*, ce dernier gagne en moyenne 1,62 [0,62 point en plus de 1] alors que l'*Extorqueur* obtient en moyenne 2,24 [1,24 point en plus de 1].

Pas plus de mémoire

Le second théorème important de l'article de W. Press et F. Dyson indique que si, dans une partie supposée infinie, la stratégie A est face à une stratégie B ayant une mémoire de k coups, il existe alors une stratégie A' qui obtient le même score moyen face à B et qui n'a qu'une mémoire de k coups. Pour obtenir un certain résultat face à une stratégie donnée, il n'est jamais nécessaire d'avoir plus de mémoire qu'elle.

La combinaison des deux résultats mathématiques de W. Press et F. Dyson affirme que face à une stratégie *Égaliseur* ou *Extorqueur*, ce ne sont pas seulement toutes les stratégies à mémoire d'un coup

qui se trouvent contraintes, mais toutes les stratégies à mémoire finie. On est tenté d'en conclure que : « les stratégies mémorisant plus que le dernier coup sont inutiles et que l'on dispose avec les ZD-stratégies de stratégies dominantes dans l'absolu pour le dilemme itéré du prisonnier ».

Certains ont d'ailleurs interprété ainsi les théorèmes démontrés, et le titre retenu pour leur article suggère que c'est le cas de W. Press et F. Dyson (bien que le contenu de leur article soit plus prudent). Pourtant, la double affirmation sur l'inutilité des stratégies à mémoire étendue et sur la dominance absolue des ZD-stratégies est totalement fautive, comme l'ont prouvé plusieurs articles parus en 2013 (voir la bibliographie). Voici pourquoi.

Considérons d'abord l'affirmation de dominance des ZD-stratégies. On sait depuis longtemps qu'au dilemme itéré du prisonnier, battre son adversaire [obtenir plus de points que lui] peut se faire aux dépens de celui qui gagne et qui aurait pu obtenir

plus de points en moyenne en acceptant d'être battu. La stratégie *Méchante* (qui joue toujours *t*) bat toute autre stratégie (c'est une évidence) ; par exemple, sur une partie de 100 coups contre *Donnant-donnant*, elle obtient 104 points, alors que *Donnant-donnant* en gagne 99. La stratégie *Gentille* (qui joue toujours *c*) ne bat pas *Donnant-donnant* et gagne 300 points en 100 coups contre *Donnant-donnant*, laquelle gagne aussi 300 points. Contre *Donnant-donnant*, *Méchante* gagne peut-être, mais elle a tort de gagner car en faisant comme *Gentille*, elle obtiendrait un bien meilleur score.

Mieux vaut s'entendre avec son adversaire

La plupart des ZD-stratégies sont un peu dans la même situation : elles ne battent leur adversaire qu'en renonçant elles-mêmes à de bons scores. Les *Extorqueurs* gagnent sur les stratégies auxquelles on les oppose, mais aux dépens du total des points gagnés. D'ailleurs, une stratégie *X-Extorqueur* (avec $X > 1$) qui joue contre elle-même n'obtient (d'après la théorie qu'on vérifie par simulation) qu'un seul point en moyenne par coup, ce qui est très médiocre. Il n'est pas vrai qu'être une bonne stratégie, c'est battre son adversaire. Mieux vaut ne pas le battre, bien s'entendre avec lui et marquer beaucoup de points.

Le cas de *Donnant-donnant* est remarquable et tel qu'on a l'impression d'un paradoxe quand on énonce ses propriétés : *Donnant-donnant* ne bat aucune stratégie individuellement et se fait battre par de nombreuses stratégies et pourtant, c'est une bonne stratégie qui gagne de nombreux tournois et compétitions évolutives. Elle gagne non pas parce qu'elle force les autres à gagner moins qu'elle, comme le fait une stratégie *Extorqueur*, mais parce qu'elle punit les stratégies qui ne veulent pas coopérer. Elle force la coopération. Face à elle, ou bien vous gagnerez peu de points, ou bien vous coopérerez, ce qui sera bon pour elle et pour vous.

C'est donc un contresens que croire que les ZD-stratégies sont bonnes. Dans des rencontres un contre un, elles dominent,

comme le fait *Méchante*, mais globalement elles jouent piteusement ! Outre l'erreur de croire que battre son adversaire, c'est gagner des points, un autre oubli a conduit à croire que les ZD-stratégies étaient dominantes : pour s'imposer, il faut jouer correctement contre soi-même. C'est important dans les tournois, mais plus encore dans les compétitions évolutives. En effet, si vous l'emportez lors des premières générations, l'arène se peuple de stratégies identiques à vous, et vous allez donc très fréquemment les rencontrer. Si vous jouez mal face à vous-même, cela se retourne contre vous.

Rien n'est faux dans les résultats mathématiques de W. Press et F. Dyson, mais en n'abordant que le problème « qui gagne dans un combat un contre un ? » et en oubliant les questions « Combien de points sont gagnés ? » et « Face à toi-même, te fais-tu du tort ? », les théorèmes démontrés ne permettent pas de conclure que les ZD-stratégies sont de bonnes stratégies.

Le résultat de W. Press et F. Dyson sur l'inutilité pour une stratégie d'avoir de la mémoire est juste dans le sens précis de ce qu'ils démontrent : si *A* est face à une stratégie *B* ayant une mémoire de *k* coups, il existe une stratégie *A'* qui obtient le même score moyen face à *B* et qui n'a qu'une mémoire de *k* coups. Mais cela ne signifie pas que face à deux stratégies *B* et *C* ayant une mémoire de *k* coups, il existe une stratégie *A'* à mémoire de *k* coups qui fasse le même score face à *B* et face à *C*. En effet, celle, *A'*, qui peut remplacer *A* face à *B* n'est pas nécessairement la même que celle, *A''*, qui peut remplacer *A* face à *C*. Le résultat de W. Press et F. Dyson sur l'inutilité de la mémoire est valable uniquement dans les combats un contre un ; il cesse d'être vrai dès qu'on envisage des tournois ou des évolutions.

Il est très utile que des chercheurs viennent explorer un domaine qui n'est pas le leur, et si W. Press et F. Dyson n'avaient pas été aussi confiants en leurs résultats, ils n'auraient pas proposé un titre provocateur à leur article – titre qui, après analyse, est faux – et ils n'auraient pas attiré l'attention sur ce qui, malgré tout, présente un véritable intérêt. *Se non è vero è bene trovato !* ■

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

BIBLIOGRAPHIE

C. Adami et A. Hintze, Evolutionary instability of zero determinant strategies demonstrates winning is not everything, *Nature Comm.*, vol. 4, 2193, 2013 (en accès libre).

C. Hilbe et al., Evolution of extortion on iterated prisoner's dilemma games, *PNAS*, vol. 110, pp. 6913-6918, 2013.

• W. Press et F. Dyson, Iterated prisoner's dilemma contains strategies that dominate any evolutionary opponent, *PNAS*, vol. 109, pp. 10409-10413, 2012.

K. Sigmund, *The Calculus of Selfishness*, Princeton University Press, 2010.

B. Beauflis, Modèles et simulations informatiques des problèmes de coopération entre agents, Thèse de doctorat, Université de Lille, 2000.

M. Boerlijst et al., Equal pay for all prisoners, *American Mathematical Monthly*, vol. 104, pp. 303-307, 1997.

W. Poundstone, *Le dilemme du prisonnier*, Cassini, 1993.

B. Beauflis, J.-P. Delahaye et P. Mathieu, Our meeting with Gradual: A good strategy for the iterated prisoner's dilemma, *Proceedings of Artificial Life V*, MIT Press/Bradford Books, pp. 202-209, 1996.

SCIENCE & FICTION

Monstres tentaculaires

Poulpes et autres calmars géants ont inspiré auteurs de romans et cinéastes. Ils semblent appartenir à la fiction, mais d'étonnants fossiles prouvent que certains ont bien existé.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ

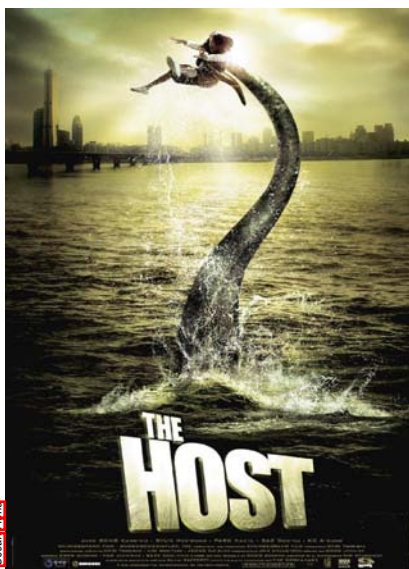
« Ce monstre est celui que les marins appellent poulpe, que la science appelle céphalopode, et que la légende appelle kraken... »

Victor Hugo
Les Travaillleurs de la mer (1866)

Ils se nomment Cthulhu, Kraken, Kroll ou Sarlacc et ont un point commun : ces monstres, les plus terrifiants de la mythologie ou de la science-fiction, sont dotés de tentacules. Pourquoi les affubler de telles excroissances ? Est-ce pour mieux susciter l'effroi ? Le dégoût ? Les animaux réels peuvent-ils nous aider à répondre à ces questions ?

Lorsqu'il s'agit de tentacules, la pieuvre est le premier animal qui vient à l'esprit. Cet animal fait partie des céphalopodes, souvent classés d'après le nombre de leurs tentacules qui varie de huit (chez les octopodes ou pieuvres) à dix (seiches et calmars, nommés décapodes ou décabranchiaux). Ces prédateurs marins, souvent agressifs, chassent à l'affût. Leurs tentacules sont de puissants bras élastiques qui rayonnent de la bouche. Ils s'immiscent dans les moindres anfractuosités pour dénicher leurs proies ou se projettent sur elles. Calmars et seiches utilisent même leurs tentacules comme massues contre leurs prédateurs.

Prise au piège, la proie est étouffée ou broyée, puis portée à la bouche, parfois encore vivante... Là, un puissant bec corné – le « bec de perroquet » – et une radula – une sorte de râpe indurée – ont raison des carapaces les plus rigides. Ce



1. THE HOST, un thriller sud-coréen (2006) met en scène un monstre tentaculaire qui emporte une jeune fille au fond des eaux.

mode de nutrition n'est pas sans rappeler celui du poulpe géant de *Prometheus* (film de Ridley Scott, 2012) et correspondant à un nouveau stade de développement d'Alien. Ces excroissances sont donc des armes redoutables, surtout quand elles sont munies de ventouses ou de crochets. Une pieuvre d'environ deux kilogrammes compte 240 ventouses pivotantes par tentacule, ce qui la rend capable de tracter une proie presque dix fois plus lourde qu'elle ! Plus discret, le nautilus, autre céphalopode, arbore 94 tentacules courts munis de cirres, sortes de filaments agrippeurs. Sa coquille spiralée rappelle celle des ammonites disparues il y a quelque 65 millions d'années, en même temps que de nombreux dinosaures.

Tentacules géants pour monstres divers

Avec 10 000 espèces fossiles dont seulement 650 existent encore aujourd'hui, les céphalopodes ont une histoire évolutive longue de près de 500 millions d'années. Mais aussi longue soit-elle, cette histoire comporte encore des zones d'ombre, et chaque grande plongée en bathyscaphe permet d'observer des espèces oubliées, tel le « vampire des abysses » : ce petit céphalopode, unique en son genre, présente des tentacules palmés, bioluminescents et recouverts de pics sur toute leur longueur. Un de ses bras peut même « cracher » un mucus lumineux qui étourdit les prédateurs dans l'obscurité des profondeurs. Citons aussi le calmar colossal (*Mesonychoteu-*



2. ANIMAL TENTACULAIRE évoquant le Cthulhu de l'écrivain H. P. Lovecraft.

this), qui atteint près de 14 mètres de longueur. Son lointain cousin le calmar géant (*Architeuthis*), qui mesure environ 18 mètres, aurait même inspiré Kraken, un monstre marin de la mythologie scandinave. Des restes retrouvés dans l'estomac d'un cachalot suggèrent qu'il aurait atteint parfois 50 mètres de longueur !

Mais la fiction dépasse une fois encore la réalité : ainsi le Kroll, sorte de céphalopode marécageux imaginé par Robert Holmes dans *Doctor Who* (saison 16, 1978-1979), mesure près de 250 mètres de longueur ! On se demande d'ailleurs comment ce mollusque, sans squelette interne, est capable de se redresser et de sortir de son marécage...

Mais les tentacules ne sont pas les seuls apanages des céphalopodes. En effet, la méduse « à crinière de lion » (*Cyanea capillata*) peut porter jusqu'à 800 tentacules de 30 mètres de long chacun ! Pas étonnant que ce monstre gélatineux ait inspiré Arthur Conan Doyle pour une de ses nouvelles mettant en scène Sherlock Holmes (*La Crinière du lion*, 1926). Ceux des cnidaires (méduses, anémones de mer, etc.), même s'ils ne portent ni crochets ni ventouses, sont équipés de cnidoblastes : ces cellules urticantes – plusieurs milliers par tentacule – plantent, par simple contact, leurs microharpons vénéneux dans la peau, provoquant de terribles brûlures, parfois même un arrêt cardiaque.

Les échinodermes présentent aussi

des tentacules : ces « lys de mer », souvent fixés sur les rochers, ont des bras munis de petites excroissances en dents de peigne, nommées pinnules et podia. En agitant l'eau, ces pseudopodes créent un courant qui rabat le microplancton vers leur bouche, située au centre. Les holothuries ou concombres de mer, autres cousins des oursins, présentent aussi des sortes de minitentacules autour de la bouche, ou tentacules péribuccaux. C'est aussi le cas de l'Amphioxus, un « poisson » archaïque dont la colonne vertébrale est remplacée par une structure cartilagineuse (la notochorde) et qui correspond à l'un des animaux tentaculaires les plus proches de l'homme !

Déjà sur Terre il y a plus de 500 millions d'années

D'ailleurs, les humanoïdes à tentacules sont présents dans la science-fiction. Le plus célèbre est Cthulhu, monstre aquatique gigantesque imaginé par Howard Phillips Lovecraft (*L'Appel du Cthulhu*, 1928). Cthulhu a une tête de seiche, des tentacules de pieuvre et des ailes de dragons ! Moins connu, mais tout aussi angoissant, Chaugnar Faugn est un monstre imaginé par l'écrivain Frank Belknap Long (*The Horror from the Hills*, 1963) : il s'agit d'une sorte d'éléphant dont les oreilles, immenses, sont soutenues par des tentacules, et qui est souvent représenté avec

une pince au bout de la trompe.

Enfin, la saga *Star Wars* n'échappe pas à la règle : ainsi le Sarlacc, dans *Le Retour du Jedi* (George Lucas, 1983), est un monstre creusant le sable de la planète Tatooine, et dont le gouffre buccal est orné de tentacules. Il digère pendant plus de 1 000 ans les proies qu'il engloutit ! Une caractéristique qui n'est pas sans rappeler la très lente digestion de la pieuvre : plus de 12 heures.

Mais il n'est pas besoin de puiser dans la fiction pour trouver des monstres tentaculaires. Il suffit de se pencher, par exemple, sur la faune de Burgess, site fossilifère situé au Canada. Datant d'environ 505 millions d'années, il regorge de fossiles à tentacules : outre *Anomalocaris*, superprédateur muni de deux tentacules trapus et articulés autour de la bouche, citons *Nectocaris* qui évoque une seiche dotée de deux longs tentacules apparemment flexibles ! Sans oublier les tentacules des plantes : les interminables racines aériennes des « figuiers étrangleurs », des ficus épiphytes (c'est-à-dire poussant sur d'autres plantes) qui s'entrelacent autour des vestiges d'Angkor et sont capables de briser des murs ! ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

retrouvez les articles de J.-S. Steyer et R. Lehoucq sur www.pourlascience.fr



ART & SCIENCE

Cache-cache dans un tableau

Le peintre américain Abbott Handerson Thayer est l'un des pères de la théorie du camouflage animal. Mais à trop vouloir généraliser ses idées, il eut pour contradicteur... le président Théodore Roosevelt !

Loïc MANGIN

De nombreuses espèces animales échappent à la vue des prédateurs en se camouflant. Ce peut être grâce à leurs formes (les poissons-pierre, les phasmes qui ressemblent à des brindilles) ou à leurs couleurs (les caméléons, certains poissons plats, les seiches). L'un des premiers à étudier ce phénomène et à tenter d'en déterminer des principes généraux fut l'Américain Abbott Handerson Thayer (1849-1921), un peintre formé pendant quatre ans à l'École des beaux-arts de Paris, notamment auprès de Jean-Léon Gérôme (1824-1904).

Le style de l'artiste est difficile à cerner, tant il mêle traditions académiques et fantaisies. Thayer est surtout connu pour ses « figures idéales » où des femmes, incarnations de la vertu, arborent tuniques vaporeuses et ailes d'anges. Ses techniques étaient peu orthodoxes et, par exemple, il mélangeait poussière et peinture. Il eut néanmoins de son vivant une certaine renommée qui fit de lui un portraitiste très demandé : Mark Twain et Henry James ont eu les honneurs de ses pinceaux. On peut aujourd'hui admirer ses œuvres dans les plus grands musées américains, à Chicago, Washington, New York...

Vers la fin de sa vie, épris de nature et fervent défenseur du darwinisme, il s'intéressa aux animaux et particulièrement au rôle protecteur de certaines couleurs. Il travailla durant sept ans à un ouvrage, *Concealing - Coloration in the Animal Kingdom* (Se camoufler - Les couleurs dans le règne ani-

mal), publié en 1909 et dont l'auteur crédité est Gerald Handerson Thayer, son fils. Les peintures qui illustrent l'ouvrage sont de beaux exemples de camouflage. On peut citer des geais bleus dans un paysage enneigé (voir l'illustration page ci-contre), un serpent invisible au milieu de feuilles mortes...

Avant cet ouvrage, Thayer s'est fait remarquer par deux contributions qui en font l'un des pères de la théorie du camouflage chez les animaux. En 1896, il expose dans *The Auk*, la revue de l'Union américaine des ornithologues, les principes de la contre-illumination, un phénomène déjà remarqué par le zoologiste britan-

Thayer fut un portraitiste très demandé : Mark Twain et Henry James ont eu les honneurs de ses pinceaux.

nique Edward Poulton en 1890 et adopté par de nombreux poissons, des oiseaux, des mammifères, etc.

Son principe est le suivant : grâce à des teintes sombres dans les zones les plus exposées au soleil et claires dans les zones les plus à l'ombre, un animal s'efface. Prenons l'exemple d'un poisson nageant près de la surface : pour un prédateur situé sous lui, son ventre se confond avec la surface éclairée, tandis que pour un autre situé au-dessus, son dos plus sombre se distingue peu sur le fond. Thayer écrit : « Le spectateur semble voir à travers un volume pourtant occupé par un animal opaque. »

En 1903, Thayer poursuit ses investigations et met au jour les principes du camouflage disruptif : des motifs très contrastés (des tâches, des rayures...) sur la parure d'un animal semblent en estomper les contours. C'est par exemple le cas du léopard.

Emporté par son enthousiasme et, selon certains, par une certaine dose d'arrogance, il généralise ses découvertes en affirmant : « Les motifs et les couleurs de tous les animaux, qu'ils soient des proies ou des prédateurs, ont pour fonction, dans certaines conditions, de les dissimuler à la vue. » C'en était trop. Dès 1911, l'ancien président américain Théodore Roosevelt, chasseur et naturaliste amateur, attaqua avec virulence les idées du peintre. C'était fondé.

Ainsi, le tableau de Thayer où des flamands roses disparaissent devant un coucher de soleil n'est pas réaliste. En effet, à contre-jour, ces oiseaux devraient plutôt apparaître comme des ombres se découpant sur le ciel. En outre, le peintre rejetait en bloc les idées de Darwin sur la sélection sexuelle qui expliquent notamment la livrée des paons.

Face à ses nombreux détracteurs, Thayer s'obstina et perdit ainsi une bonne part de sa crédibilité. Néanmoins, au moment de la Première Guerre mondiale, ses idées furent reprises et appliquées au camouflage des navires militaires américains. ■

R. Behrens, *Revisiting Abbott Thayer : Non-scientific reflections about camouflage in art, war and zoology*, *Phil. Trans. R. Soc. B*, vol. 364, pp. 497-501, 2009.



© S. J. INSERM INSITUATION 2014

IDÉES DE PHYSIQUE

Grand ménage spatial à l'électricité

Comment se débarrasser des débris qui encombrant l'espace autour de la Terre ? L'utilisation de forces électromagnétiques de faible intensité est envisagée.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

L'espace au voisinage de la Terre se remplit progressivement de débris variés, de la pièce détachée lors d'une collision accidentelle de deux satellites au satellite entier dont le contrôle a été perdu ou qui est en fin de vie. Certaines orbites commencent déjà à être encombrées et, à terme, les risques d'impact avec ces déchets deviendront inacceptables pour les activités spatiales.

Dans cette perspective, des techniques de nettoyage sont à l'étude. À côté de méthodes reproduisant ce que nous faisons sur Terre, telle la collecte mécanique de déchets à l'aide de bras robotisés, les scientifiques imaginent des procédés mettant à profit le fait que dans l'espace, en l'absence de frottement, de petites forces appliquées longtemps peuvent avoir de grands effets.

Lorsque l'atmosphère est assez dense, les frottements de l'air suffisent à freiner les objets spatiaux en orbite et à les faire retomber sur Terre, voire les désintégrer s'ils sont assez petits. Ainsi, à 200 kilomètres d'altitude, la durée de vie d'un satellite est d'environ 60 jours. Mais dès que l'on s'élève, la densité de l'air, donc les frottements, diminuent et la durée de vie augmente. À 250 kilomètres d'altitude, on passe à 220 jours ; dès 500 kilomètres, le satellite reste en orbite quelques années, et à 1 000 kilomètres, c'est plusieurs siècles !

Aussi, pour ces orbites basses, comprises entre 500 et 2 000 kilomètres

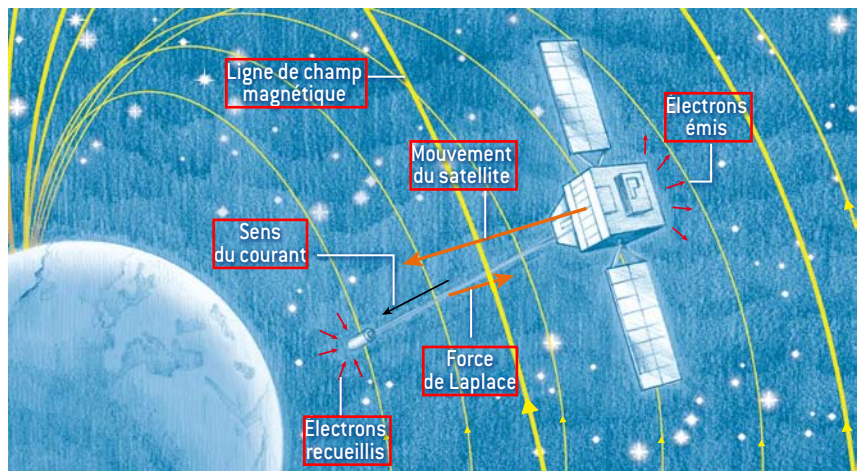
d'altitude, la meilleure méthode pour se débarrasser d'un satellite est d'abord de le faire descendre à une altitude de 200 kilomètres, puis de laisser agir l'atmosphère. Pour ce faire, il faut le décélérer d'environ 400 mètres par seconde. Comment ?

Comment freiner un débris en orbite ?

La solution actuelle est d'utiliser des moteurs à réaction qui éjectent de la masse dans la direction du mouvement. Hélas, la quantité de matière requise pour freiner suffisamment le satellite est de l'ordre d'un cinquième de sa masse. C'est donc 20 pour

cent de masse supplémentaire qu'il faut mettre en orbite pour s'assurer de la fin de vie, autant de masse perdue pour des applications plus intéressantes. Peut-on envisager des alternatives ?

Acquérir une vitesse de 400 mètres par seconde paraît considérable. Pourtant, la force nécessaire n'est pas si importante si l'on a du temps. Ainsi, pour une durée de quatre mois, soit dix millions de secondes, l'accélération requise est de l'ordre de 4×10^{-5} mètre par seconde carrée, soit quatre millièmes de l'accélération de la pesanteur. Pour un satellite d'une tonne, cela correspond à une force de 40 millinewtons – le poids d'une masse de 4 grammes !



1. DANS UN LONG CÂBLE CONDUCTEUR suspendu au satellite, qui se déplace dans le champ magnétique terrestre, ce dernier induit un courant électrique. Le circuit est fermé grâce au plasma conducteur ambiant. La force dite de Laplace exercée par le champ sur ce courant permet de modifier la trajectoire du satellite.

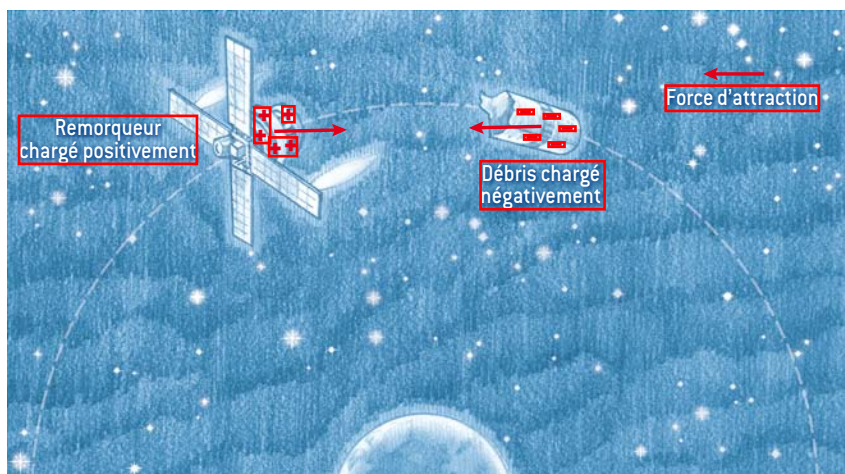
Comment engendrer une telle force, certes de faible intensité, mais de longue durée ? Une première idée est, comme dans les moteurs électriques, de mettre à profit la force de Laplace qu'exerce un champ magnétique sur un fil conducteur parcouru par un courant électrique.

Un câble conducteur en guise de frein

L'aimant est tout trouvé : c'est le champ magnétique terrestre. Restent le conducteur électrique et le courant. Le champ magnétique terrestre étant faible (de l'ordre de 20 microteslas aux altitudes envisagées), pour obtenir une force de 40 millinewtons avec un courant modéré, disons de l'ordre d'une fraction d'ampère, il faut un conducteur long de plusieurs kilomètres. Cette longueur est tout à fait envisageable dans l'espace : elle correspond à une masse de l'ordre de 7 kilogrammes pour un câble en aluminium long de 5 kilomètres et d'un millimètre de diamètre.

Comment le câble est-il alimenté ? Ce conducteur étant en mouvement dans un champ magnétique, une tension est induite entre ses extrémités. Avec une vitesse de 7,2 kilomètres par seconde à une altitude de 1 300 kilomètres, on obtient des tensions de l'ordre du kilovolt si le câble pend verticalement sous le satellite, lequel constitue alors le pôle positif s'il tourne d'Est en Ouest autour de la Terre (voir la figure 1).

Le câble spatial ainsi mis sous tension, un courant électrique y circule. Pourquoi ? Comment le circuit électrique est-il fermé ? Il faut se souvenir qu'à ces altitudes, le satellite baigne dans un plasma (gaz ionisé) faiblement conducteur. Le câble lui-même, dans le cas du prototype *Terminator Tether* développé par une compagnie américaine, ou un ballon conducteur dans d'autres projets, collecte les charges du plasma. Ces dernières circulent alors dans le câble et, pour éviter toute accumulation aux extrémités, ce qui interromprait le courant, le pôle positif du câble (cela peut être le satellite lui-même) est équipé d'un canon à électrons qui réinjecte dans le plasma les électrons excédentaires. Le circuit électrique est ainsi fermé, le tout



2. POUR EXPULSER UN DÉBRIS D'UNE ORBITE GÉOSTATIONNAIRE, une possibilité serait d'utiliser un satellite remorqueur qui, à l'aide d'un canon à électrons, chargerait négativement le débris et se chargerait positivement, créant ainsi une attraction entre les deux objets.

pour une trentaine de kilogrammes, soit de l'ordre de deux pour cent de la masse d'un satellite ordinaire.

Pour diverses raisons, cette méthode n'est hélas pas utilisable pour les satellites géostationnaires, en orbite à 36 000 kilomètres d'altitude. Notamment, le champ magnétique bien plus faible (0,1 microtesla), le plasma bien moins conducteur, et la vitesse du satellite moins élevée (3 kilomètres par seconde) ne peuvent être compensés par un allongement raisonnable du câble.

Débris géostationnaires tractés à distance

L'altitude géostationnaire est très recherchée (on y place notamment les satellites de télécommunication et ceux d'observation) et on ne peut pas, comme pour les orbites basses, se placer à côté, un peu plus haut ou un peu plus bas : on perdrait le caractère géostationnaire. La place y est donc limitée et chère. Or actuellement, si près de 1 200 objets y sont catalogués, seuls 400 d'entre eux sont des satellites en fonctionnement et sous contrôle.

L'idée la plus prometteuse pour nettoyer cette orbite est non pas de faire retomber les objets vers la Terre, mais de les repousser dans des orbites-cimetières, situées 200 à 300 kilomètres au-dessus de l'altitude

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTUY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr



BIBLIOGRAPHIE

H. Schaub et D. F. Moorer Jr., **Geosynchronous large debris reorbiter: Challenges and prospects**, American Astronautical Society, document AAS 10-311, 2010 (<http://hanspeterschaub.info/Papers/Schaub2010.pdf>).

R. Hoyt et R. Forward, **The Terminator Tether™: Autonomous deorbit of LEO spacecraft for space debris mitigation**, American Institute of Aeronautics and Astronautics, document AIAA 00-0329, 2000 (www.tethers.com/papers/TTReno00.pdf).

géostationnaire. Pour ce faire, il semble nécessaire d'utiliser un satellite remorqueur. Mais comment établir le lien entre la remorque et le débris ? L'une des idées proposées est simple et séduisante : charger électriquement le remorqueur ainsi que l'objet tracté à distance (donc sans risque de collision) de façon à ce qu'ils s'attirent (voir la figure 2). Avec une différence de potentiel de quelques dizaines de kilovolts et une séparation de 15 à 25 mètres, la force attractive serait de quelques millinewtons, suffisante pour changer d'orbite en quelques dizaines de jours (un gain de quelques kilomètres à chaque révolution). Il est en revanche nécessaire que le remorqueur ait ses propres moteurs.

La réalisation d'une telle opération nécessiterait là encore un canon à électrons. Par une manœuvre d'approche, le

remorqueur se placerait sur la même orbite que le débris à déplacer, à une vingtaine de mètres devant ce dernier. Il mettrait alors en action son canon à électrons en visant le satellite cible. Cela aurait pour effet de charger ce dernier négativement, tandis que le remorqueur, se vidant de ses électrons, se chargerait positivement.

Le plasma ambiant étant peu conducteur à cette altitude, les satellites ne se déchargeraient pas trop vite. Les deux objets, portant des charges électriques de signes opposés, s'attireraient l'un l'autre. On ajusterait ensuite la force de traction du remorqueur et le débit du canon à électrons pour que le remorqueur et le débris à déplacer gardent une distance fixe et subissent la même accélération. Ils s'écarteraient alors de conserve de l'orbite géostationnaire.



Palais de la Découverte

les conférences

au Palais de la découverte

Entrée libre dans la limite des places disponibles.

> les samedis 18 janvier, 1^{er} et 15 février à 14h30

CYCLE Mathématiques, jeux et comportements

Le jeu du dilemme du prisonnier permet d'étudier notre manière d'agir.
Le cube de Rubik ouvre une voie d'exploration des mathématiques combinatoires...
Chercheurs et médiateurs scientifiques explorent des mathématiques par le jeu.

► Avant et après chaque conférence, participez à des « récréations mathématiques » animées par un médiateur scientifique du Palais de la découverte.

Avec le soutien de

programme complet sur www.universcience.fr

SCIENCE tangente culture plus

Merveilleux nombres premiers

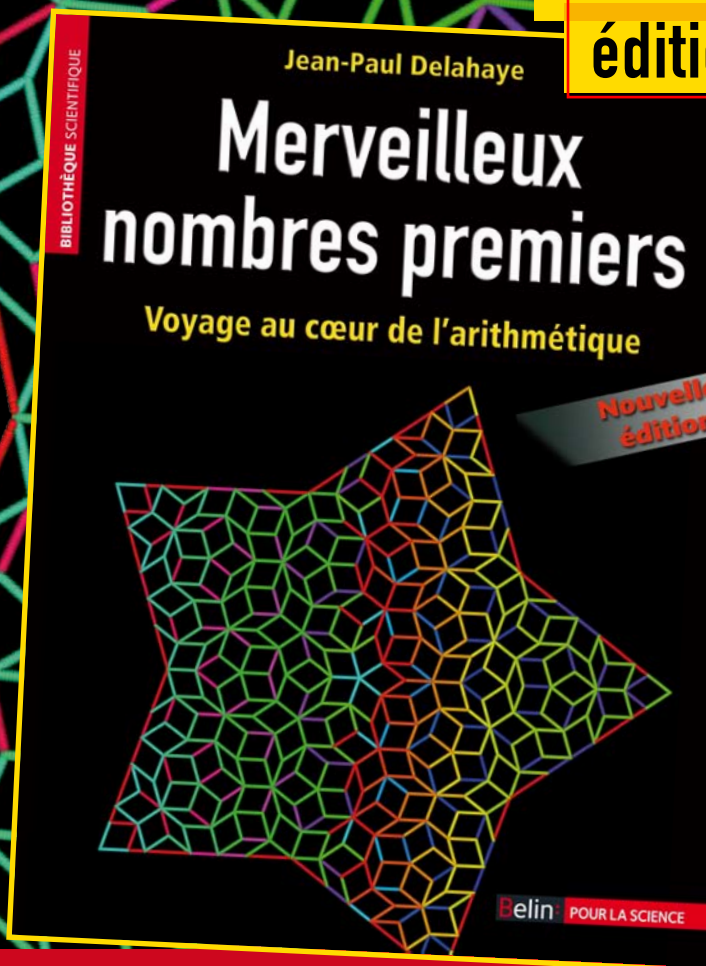
Voyage au cœur de l'arithmétique

Jean-Paul Delahaye

Nouvelle
édition

Les nombres premiers fascinent. Connus dès les débuts de l'arithmétique, ils ont excité la curiosité de milliers de mathématiciens. Ils sont au cœur de la science des nombres, car tout entier se décompose de façon unique en un produit de facteurs premiers. Dans cet ouvrage, l'auteur mêle éclaircissements théoriques et anecdotes piquantes.

Éditions Belin/Pour la Science 2013
296 pages – 28 euros
ISBN 978-2-8424-5117-2



BON DE COMMANDE

POUR LA
SCIENCE

à découper ou à photocopier et à retourner accompagné de votre règlement à : Groupe Pour la Science • 628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil • Tél. : 0 805 655 255 • e-mail : pourlasciencevpc@audin.fr

☐ Oui, je commande l'ouvrage *Merveilleux nombres premiers* de J.-P. Delahaye.

..... exemplaires × 28,00 € (Réf. 075117) = ... €
Frais de port (4,90 € France – 12 € étranger) + ... €
TOTAL À REGLER = ... €

Je choisis mon mode de règlement :

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

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

C.P. : _____ Ville : _____
Pays : _____ Tél. : _____
pour le suivi client (facultatif)

Numéro _____
Date d'expiration _____
Cryptogramme _____

Signature obligatoire

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

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



NBRP435

Offre valable jusqu'au 31/01/14. Dans la limite des stocks disponibles.

NOUVELLES OFFRES NUMÉRIQUES !

ACCÉDEZ À TOUTES LES ARCHIVES
DE *POUR LA SCIENCE* DEPUIS 1996

Des gigaoctets de culture
scientifique à votre disposition !



FORMULE WEB ILLIMITÉ

- Version **numérique** des numéros *Pour la Science* + *Dossiers* compris dans votre abonnement
- Accès illimité à 18 ans d'archives

6,5 €/mois

FORMULE INTÉGRALE

- Version **papier + numérique** des numéros *Pour la Science* + *Dossiers* compris dans votre abonnement
- Accès illimité à 18 ans d'archives

8 €/mois

BULLETIN D'ABONNEMENT

POUR LA SCIENCE

À retourner accompagné de votre règlement dans une enveloppe non affranchie à : Service Abonnements Pour la Science • Libre réponse 90382 • 75281 Paris cedex 06

1. MA FORMULE

- ☐ **Oui, je m'abonne à l'offre Web illimité pour 6,5 €/mois.** J'ai un accès numérique illimité aux archives de *Pour la Science* et *Dossier Pour la Science* depuis 1996 et un accès numérique offert aux nouveaux numéros (durant la durée de mon abonnement).
- ☐ **Oui, je m'abonne à l'offre intégrale Papier + Numérique illimité pour 8 €/mois.** Je reçois la version papier de *Pour la Science* et *Dossier Pour la Science* et j'ai un accès offert à leurs versions numériques. J'ai un accès numérique illimité à leurs archives depuis 1996 (durant la durée de mon abonnement).

Mon e-mail (à remplir en majuscules – Obligatoire pour activer mon abonnement numérique)

À réception de ce bulletin, comptez un délai de 4 semaines maximum pour recevoir votre numéro d'abonné. Passé ce délai, merci de contacter le service abonnements à abonnements@pourlascience.fr

2. MES COORDONNÉES

Nom : _____ Prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____ Pays : _____ Tél. : _____
* Pour le suivi client (facultatif)

3. MON MODE DE RÈGLEMENT

En signant ce formulaire de mandat, vous autorisez *Pour la Science* à envoyer des instructions à votre banque pour débiter votre compte, et votre banque à débiter votre compte conformément aux instructions de *Pour la Science*. Vous bénéficiez du droit d'être remboursé par votre banque selon les conditions décrites dans la convention que vous avez passée avec elle. Une demande de remboursement doit être présentée dans les 8 semaines suivant la date de débit de votre compte pour un prélèvement autorisé.

Note : Vos droits concernant le présent mandat sont expliqués dans un document que vous pouvez obtenir auprès de votre banque.

Mandat de prélèvement SEPA

référence unique du mandat (ne rien inscrire ci-dessus)

Votre nom _____

Votre adresse _____

Nom/prénom du débiteur _____

Numéro et nom de la rue _____

Code postal _____ Ville _____

Les coordonnées de votre compte _____

Numéro d'identification international du compte bancaire – IBAN (International Bank Account Number) _____

Code international d'identification de votre banque – BIC (Bank Identifier Code) _____

Nom du créancier Pour la Science • 8 rue Férou • 75006 Paris
ICS : n° FR92ZZZ426900

Type de paiement Paiement récurrent/répétitif

A _____
Date _____
Signature _____

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 ☐

SCIENCE & GASTRONOMIE

Des goûts qui changent

En créant des gels qui se réorganisent, on modulerait la libération au fil du temps des composés dissous dans la phase aqueuse du gel.

Hervé THIS



Les aliments traditionnels sont le plus souvent des gels, et les aliments du futur le seront aussi. En août 2012, nous avons vu des façons de structurer des gels et d'éviter la monotonie des masses alimentaires homogènes, sans contraste. Cette structuration est bienvenue, car notre appareil sensoriel a évolué de façon à reconnaître les contrastes : de consistances, de saveurs, d'odeurs, de températures, de couleurs...

Toutefois nous n'avions pas envisagé l'évolution temporelle qui participe à notre bonheur gourmand, par exemple dans la dégustation de certains vins. Ou de mets tels qu'un pistou fait de basilic broyé d'une part au pilon, et d'autre part au mixeur, avec une « attaque », puis de la longueur en bouche. Les spécialistes de l'analyse sensorielle ont mis au point des techniques d'analyse nommées « dominance temporelle des sensations » : les dégustateurs disposent d'un certain nombre de descripteurs (sucré, salé, fromage, frais...) et pressent des touches sur un ordinateur quand ils perçoivent le début d'une sensation.

Une manière de créer des mets au profil temporel intéressant est de produire des gels dynamiques. Tous les gels sont constitués d'un réseau solide tridimensionnel où un liquide est piégé. Ainsi, dans un aspic, la gélatine apporte des protéines qui se lient par trois aux nœuds du réseau. Ainsi, dans les confitures, les pectines se lient à la fois par des forces hydrophobes (favorisées par le sucre) et par des ions divalents (calcium, cuivre de la bassine) entre des groupes carboxylate COO^- .

Les sous-unités d'un réseau seront toujours des objets assez grands (à l'échelle moléculaire) liés par des forces chimiques. Ces forces sont, par ordre d'énergie croissante : les forces de van der Waals (toujours présentes), les liaisons hydrogène (faibles, entre un atome d'hydrogène et un atome d'oxygène ou d'azote, par exemple), les ponts disulfures (entre deux atomes de soufre), les liaisons covalentes (classiques, par exemple entre deux atomes de carbone) et les liaisons électriques entre atomes ou groupes d'atomes électriquement chargés. Les premières sont trop faibles pour faire des gels et les dernières font des gels irréversibles.

Les liaisons hydrogène ou les ponts disulfures sont classiquement responsables des masses de blanc d'œuf cuit et sont « labiles », ce qui signifie qu'ils peuvent se défaire et se refaire. Par exemple, des physico-chimistes qui ont mis en œuvre la « chimie supramoléculaire » savent produire des polymères qui « cicatrisent », par rétablissement de telles liaisons. Le prix Nobel Jean-Marie Lehn a imaginé des « dynamères », polymères dynamiques, qui se réorganisent selon les circonstances.

Ne pourrions-nous pas produire des « dynagels », c'est-à-dire des gels dont le réseau se réorganiserait soit au cours du temps, soit quand l'aliment est mis en bouche ? Le contenu en ions de la salive peut commander ces évolutions, tout comme l'augmentation de température (une bouchée de yaourt à 7 °C mise en bouche est portée à la température de 20 °C en cinq secondes environ).

Pour de tels gels, la consistance se modifierait en cours de dégustation et la libération des sous-unités du réseau dans la phase liquide du gel amènerait des associations supramoléculaires avec les solutés (composés responsables de l'odeur, de la saveur, de la couleur) grâce auxquelles on contrôlerait l'évolution du goût des aliments.

Doux rêve ? Déjà, les aliments qui contiennent des matières grasses, tels le chocolat, le foie gras ou le beurre, ont une consistance qui change quand la partie solide de cette matière fond dans la bouche. La consistance et la rhéologie de certaines sauces changent avec le mouvement en bouche ; par exemple, la mayonnaise se fluidifie.

Le temps n'est-il pas venu de choisir des dynagels pour les cuisiniers ? Les chimistes pourraient sélectionner ces composés, porteurs d'atomes capables d'établir des liaisons hydrogène, des ponts disulfures, ou, plus généralement, des groupes donneurs ou accepteurs d'électrons, en vue de créer les assemblages supramoléculaires qui feront le réseau de tels gels. ■



Hervé THIS est physico-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



→ SCIENCE ET SOCIÉTÉ

L'opinion publique et la science

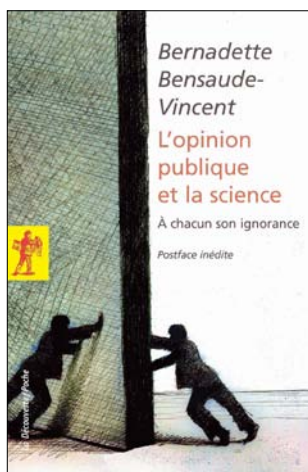
Bernadette Bensaude-Vincent
Poche/La Découverte, 2013
(226 pages, 11 euros).

Que ce livre soit réédité en poche plus de 14 ans après sa première publication marque bien son importance, laquelle a encore été accrue par une mise en perspective historique.

« La distance entre science et opinion, écrit l'auteur, ne tombe pas du ciel. » On peut évidemment la faire remonter à Platon, mais après Platon vint Aristote, qui réhabilita la « doxa ». Et on ne peut la faire remonter aux origines des sciences modernes que si l'on oublie qu'un public alors naissant fut l'allié de la science contre une « opinion » définie par son adhésion aux valeurs établies.

Car, jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, le public, un public lettré bien entendu, est protagoniste de droit de l'aventure scientifique, qui se définit alors contre l'autorité des savoirs traditionnels. Il est appelé à témoin, appelé à constater les faits et à entendre les arguments qui ruinent cette autorité. Les deux registres du savoir et de la politique sont associés dans une République des lettres qui réunit savants et amateurs éclairés, hostiles à toute forme de soumission ou de fanatisme.

Cette « République », pourtant, montre B. Bensaude-Vincent, était déjà « fissurée par une rivalité tenace entre l'esprit critique, théoriquement propre à tout individu, et l'autorité de l'expert, qui passe par l'institution académique. » Et la fissure deviendra gouffre lorsque le public fera place à l'opinion – une opinion définie selon les cas comme ignorante



mais éducable, intéressée aux seuls bienfaits dont la science est source, ou encore irrémédiablement vulnérable à tous les préjugés.

L'affaire se compliquera lorsque le progrès dont les sciences se targuent d'être le moteur sera mis en cause et lorsque le scepticisme des usagers et des consommateurs face aux assurances des experts s'organisera de manière publique. Le retour d'un public se définissant comme « citoyen », c'est-à-dire protagoniste de droit sur la scène politique, est d'ailleurs la nouvelle donne présentée par la postface inédite du livre.

Aujourd'hui, il n'est plus question – en tout cas officiellement – de disqualifier l'opinion, et les autorités mettent en avant un « modèle participatif », et ce dans une approche gestionnaire, envisageant bénéfices et risques, plutôt que politique. La « démocratie technique » est encore loin, et plus que jamais il importe de réhabiliter une opinion qui soit celle d'Aristote, non de Platon, une opinion qui ne manque pas de « jugeote » quant aux mots d'ordre auxquels on entend, encore et toujours, la soumettre.

→ Isabelle Stengers
Université libre de Bruxelles

→ ART ET SCIENCE

L'art-chimie

Ph. Walter et F. Cardinali
Michel de Maule, 2013
(175 pages, 45 euros).

Grâce aux nouvelles technologies, les auteurs mènent une enquête poussée dans le laboratoire des artistes. Elle met en lumière le lien intime existant entre la dimension matérielle des œuvres d'art et leur dimension immatérielle.

Physico-chimiste, Philippe Walter a fait partie de l'équipe de chercheurs chargée en 2004 de dévoiler le mystère entourant la conception de La Joconde. Le chef-d'œuvre de Léonard de Vinci a été observé sous toutes les lumières : lumière naturelle, infrarouges, ultraviolets et rayons X. Ces « éclairages » ont révélé par quels moyens techniques Léonard est parvenu à réaliser son intention : « Veille à que tes ombres et lumières se



fondent sans traits ni lignes comme une fumée ». Aussi le sfumato (de l'italien *fumo* signifiant fumée), procédé traditionnellement associé à son génie d'artiste, renvoie à son génie de chimiste. Par définition immatérielle, l'aura légendaire qui émane du tableau est donc tributaire d'un procédé technique, matériel : le sfumato. Pour conférer à son portrait un caractère impar-

pable, insaisissable, Léonard, qui était aussi un grand expérimentateur scientifique, a augmenté de façon considérable le nombre des glacis (couches légères et transparentes de peinture ou de vernis à peine teinté) révolutionnant la technique de la peinture à l'huile.

Depuis le musée du Louvre jusqu'aux grottes préhistoriques, de véritables « laboratoires transportables » permettent aujourd'hui aux équipes scientifiques de mener leurs expertises en allant à la rencontre des œuvres d'art, grâce à la miniaturisation des techniques analytiques et au développement d'outils portables. La découverte en Dordogne, dans la grotte de l'Abri du Poisson, de l'attirail d'un artiste préhistorique suggère que depuis la nuit des temps, l'artiste-artisan se transforme en véritable chimiste chaque fois qu'il parvient, à travers le broyage et l'emploi de liants adaptés, à créer ses pigments.

Au XIX^e siècle, l'apport de l'industrie chimique a enrichi de façon considérable la palette du peintre, mais non sans conséquences. Une méthode très élaborée d'analyse (la spectrométrie d'absorption des rayons X) permet de mesurer aujourd'hui l'importante dégradation des couleurs utilisées par les artistes de l'époque. Pour retrouver les couleurs originelles des œuvres, une possibilité est offerte par les nouvelles technologies : la coloration virtuelle des tableaux à travers l'éclairage multidirectionnel d'un projecteur numérique.

Serons-nous alors encore face à l'original ? Par ces interrogations, à travers l'art-chimie, les sciences de la matière rencontrent les neurosciences, ce qui ouvre la voie à une approche multidisciplinaire de l'étude de l'art.

→ Marie-Josée Buggé
École Georges Méliès, Orly

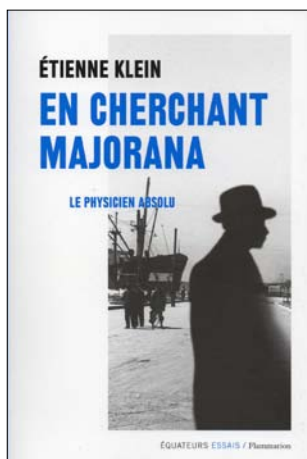
→ HISTOIRE DES SCIENCES

En cherchant Majorana

Étienne Klein

Flammarion, 2013
(170 pages, 17 euros).

La figure du physicien italien Ettore Majorana est moins populaire, me semble-t-il, que celles des mathématiciens Galois ou Ramanujan. Il ne leur cède en rien, pourtant, quant à l'extraordinaire fulgurance de la pensée. En outre, de nombreux



livres lui ont été consacrés, dont celui, paru en 1975, du célèbre romancier Leonardo Sciascia. L'enquête d'É. Klein, intéressante, sensible, bien écrite, devrait raviver l'attention du public sur cette figure insolite.

Les morts prématurées de Galois et de Ramanujan ont contribué à leur légende, mais, pour frapper les esprits, Majorana a fait mieux, si l'on ose dire : en 1938, il a disparu sans laisser de traces, alors qu'il était dans sa trente-deuxième année. Aucune enquête n'a jamais abouti et il y a désormais fort peu d'espoir d'éclaircir le mystère. Qu'il se soit suicidé en se jetant d'un bateau dans la baie de Naples est plau-

sible, mais il peut aussi s'être réfugié dans un couvent. Les raisons pour lesquelles Majorana a organisé sa disparition ne sont pas moins mystérieuses. L. Sciascia a avancé une hypothèse : pressentant que la physique nucléaire mènerait à la bombe atomique, Majorana a voulu se retirer de cette entreprise. É. Klein réfute cette idée. Selon lui, nul n'était en mesure, à l'époque, de prévoir la possibilité d'une réaction en chaîne à l'issue de la fission d'un noyau d'uranium 235. En outre, aucun témoignage ne montre Majorana soucieux des effets délétères de la science. Son geste aurait plutôt pour origine des difficultés psychologiques. Majorana était un génie de la trempe de Galilée, mais il payait ses dons d'une incapacité à vivre parmi les hommes.

É. Klein est allé sur les lieux jadis fréquentés par Majorana, avec l'espoir vague et, bien sûr, vain, qu'ils auraient quelque révélation à faire. Le passé ainsi ressuscité joue ses tours habituels, avec son cortège de souvenirs fallacieux et de certitudes soudaines mais éphémères. Physicien lui-même, É. Klein refuse que « la disparition cache l'œuvre ». Il résume, avec clarté, la teneur des travaux de Majorana sur l'atome et sur l'interaction nucléaire, et examine leur portée toujours actuelle, puisqu'ils pourraient aider à résoudre le problème posé par la matière noire.

L'enquête ne met pas fin à la ronde obsédante des supputations sur le sort et les motivations du physicien italien. « Majorana est une particule quantique dont la destinée superpose une multitude de trajectoires, sans qu'aucune puisse être considérée plus réelle que les autres », écrit É. Klein. Rien d'étonnant, alors, à ce que l'expression *La disparition de Majorana* ait pour anagramme *J'adorai la dimension à part...*

→ Didier Nordon

→ PHYSIQUE

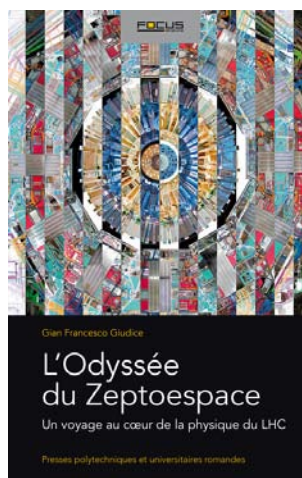
L'odyssée du zepto-espace

Gian Francesco Giudice

PPUR, 2013
(348 pages, 29,50 euros).

Le zepto-espace, dont l'auteur, physicien théoricien au CERN, nous propose une visite guidée, c'est l'univers à l'échelle du millième de milliardième de milliardième de mètre, c'est-à-dire du zeptomètre. Cet ouvrage sur les méthodes expérimentales de la physique des particules est centré sur la description du LHC, le plus grand collisionneur de particules du monde, seule machine à pouvoir explorer des échelles spatiales aussi petites. C'est le LHC qui a récemment conduit à la découverte du boson de Higgs, au CERN.

Parmi les nombreux ouvrages publiés ces derniers mois sur ce sujet, celui-ci se distingue sur plusieurs points. Tout d'abord, on y trouve une réelle volonté de faire ressentir les échelles



Brèves

Sur la science et au-delà

Christian de Duve et Jean Vandenhoute

Odile Jacob, 2013
(242 pages, 21,90 euros).



Non pas spiritualiste, non pas matérialiste, mais les deux à la fois. Voilà comment se définit Chr. de Duve dans ce livre d'entretiens, où il se dit moniste, c'est-à-dire persuadé que l'Univers constitue un tout fait d'une seule substance dans laquelle le matériel et le spirituel sont inséparables. Cela, ses commentaires scientifiques, ses considérations sur les fondements évolutionnistes de l'éthique, et le pessimisme profond que lui inspire la croissance démographique sont quelques-unes des raisons de découvrir un discours humaniste et intéressant.

Enquête sur un aventurier de l'esprit

Charles H. Smith

Évolution, 2013
(300 pages, 22 euros).



Souvent, on ne connaît Alfred Russel Wallace qu'à travers Darwin. Aussi, traduire en français le livre que C. H. Smith a consacré à ce géant après avoir voué sa carrière à étudier sa pensée est un effort bienvenu. La partie consacrée aux relations entre Wallace et Darwin est particulièrement passionnante, car elle révèle que la publication de l'essai où Wallace introduisit la sélection naturelle fut manipulée par les grands scientifiques anglais pour protéger Darwin, mais que Wallace s'en trouva bien. Cela lui épargna le combat nécessaire pour installer la théorie de l'évolution !

Baronnies provençales Mont Ventoux et Mont de Lure

Christian Montenat

Flammarion, 2013
(648 pages, 23 euros).



Le mont Ventoux est vanté et le mont de Lure mérite de l'être. La géologie, les paysages, le bâti et l'histoire de ces coins de France valent le détour. Écrit par un connaisseur de la région, ce livre en forme de guide géologique et historique en rend évidente la splendeur, tant par des textes pertinents que par de belles photographies judicieusement choisies. Ces milieux karstiques et marno-calcaires sont si spectaculaires que des amateurs viennent du monde entier les visiter. Ce livre est pour eux.

Brèves

Curiosités minérales

Dider Nectoux et Jean-Michel Le Cléac'h
Omniscience, 2013
(235 pages, 29,90 euros).



Une pépite ! Cet ouvrage présente une partie de la collection du musée de Minéralogie de l'école des Mines de Paris. Chaque double page met en avant un minéral. Des informations sur la composition chimique et les propriétés des minéraux permettent de les classer et de voir leur diversité. Les photographies de Cyrille Benhamou sont magnifiques. Le texte qui les accompagne fait le choix du surprenant, de la curiosité et de l'anecdote, dévoilant les aspects passionnants de ces minéraux, de leur découverte, de leur utilisation aujourd'hui ou de leur histoire géologique.

Les caprices du Nobel

William Hosten
L'Harmattan, 2013
(230 pages, 20 euros).



Toutes les façons de parler de sciences sont bienvenues. Le roman historique en est une qui séduit. Dans cet ouvrage, le lecteur pénètre dans les arcanes du monde de la recherche scientifique et découvre des chercheurs dont l'imagination, la ténacité, la débrouillardise et la motivation sans faille viennent à bout des difficultés techniques, font naître des amitiés durables, mais n'empêchent pas rivalités et rancœurs tenaces. La découverte de l'insuline a marqué un tournant dans l'histoire de la médecine, et a changé le sort des personnes diabétiques. Elle est au cœur de ce roman où transparaît aussi la passion de l'auteur... lui-même chercheur.

Radium girl

Jean-Marc Cosset
Odile Jacob, 2013
(212 pages, 20,90 euros).



Sous la forme d'un thriller inspiré de faits réels, Jean-Marc Cosset raconte la lutte, dans les années 1920, aux États-Unis, d'ouvrières gravement contaminées par de la peinture au radium, et les manœuvres sans scrupules de la société *US Radium*, qui les employait en connaissant les dangers de ce produit, pour empêcher la justice de passer. Ce livre est d'autant plus émouvant que l'affaire de ces ouvrières est ancienne, mais en rappelle d'autres du même genre, récentes et non moins révoltantes.

extraordinairement petites mises en jeu. L'auteur a bien compris qu'une expression comme celle qui ouvre cet article, un « milliardième de milliardième de milliardième de mètre », ne peut absolument rien évoquer chez le lecteur, et il s'efforce tout au long de l'ouvrage de trouver des équivalents concrets que l'esprit peut immédiatement saisir. On y apprend notamment que le détecteur CMS pèse 14000 tonnes, soit environ 80 *Boeing 747-400*, que chaque dipôle du LHC est soumis à des forces magnétiques équivalentes au poids d'un millier d'éléphants ou que ces dipôles ont le même prix au kilogramme (700 000 euros pour 30 tonnes) que le chocolat suisse !

Ce parti pris de stimulation de l'imagination par l'illustration concrète des ordres de grandeur n'est qu'une des facettes de la pédagogie développée par l'auteur. Mentionnons aussi le plaisir que prend ce dernier à parsemer son récit d'intéressantes anecdotes sur les hommes et les femmes qui ont fait la déjà longue histoire de la physique des particules.

Enfin, il consacre une partie importante de l'ouvrage aux détecteurs qui équipent le LHC, leur fonctionnement mais aussi leur construction, leur mise en place, les collaborations industrielles, les efforts politiques, diplomatiques, parfois juridiques, qui ont dû être déployés pour mener à bien ces projets titanesques. Outre son impact sur la physique des particules, la construction même du LHC et des expériences qui l'entourent est un immense exploit technique auquel ce livre rend hommage de manière magistrale.

→ **Richard Taillet**
Université de Savoie

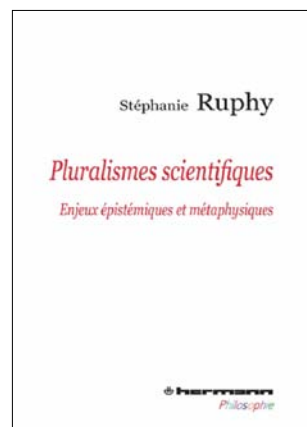
→ PHILOSOPHIE DES SCIENCES

Pluralismes scientifiques

Stéphanie Ruphy
Hermann, 2013
(286 pages, 28 euros).

La science est-elle une ou plurielle ? Cette question sur l'unité ou la pluralité des sciences paraît abstraite. Elle est pourtant très politique. Par exemple, dans les années 1990, l'autonomie de la physique de la matière condensée vis-à-vis de la physique des particules a été débattue jusque dans les couloirs du Congrès américain à propos de questions de financement. Fallait-il les financer à part, ou ensemble étant donné que l'une est la fille de l'autre ? Cela dit, au-delà de ces enjeux pratiques, cette question de l'unité des sciences touche à d'épineux problèmes épistémologiques, comme le montre ce livre.

Incontestablement, c'est une question difficile, d'autant plus qu'elle se décline selon une pluralité de formes. Elle peut concerner la nature même de la réalité. Ainsi, on peut se demander si le monde est constitué de différentes sortes de choses, irréductibles les unes aux autres. Elle peut aussi porter sur nos outils de connaissance. Ainsi, on peut se demander si nos théories peuvent toutes se ramener à une structure unique ; ou si, au contraire, nos connaissances théoriques ne formeraient pas une sorte de patchwork dont les pièces demeureraient autonomes les unes par rapport aux autres. Cette question de l'unité des sciences se pose aussi à propos de l'existence de plusieurs modèles explicatifs d'un



même phénomène, incompatibles entre eux : faut-il y voir l'illustration d'un pluralisme indépassable ou doit-on attendre une convergence de ces modèles ? Enfin, s'interroger sur l'unité des sciences peut être une façon de se demander s'il existe une seule manière de classer les « entités naturelles », comme les espèces vivantes, les galaxies, etc., ou s'il faut considérer que la pluralité actuelle des taxinomies est indépassable.

L'existence de cette pluralité de questions sur l'unité des sciences montre qu'il n'y aurait pas de sens à se déclarer moniste ou pluraliste tout court. On peut l'être de différentes façons. On pourrait même être pluraliste sur certains aspects et moniste sur d'autres. En tout cas, passant en revue les différentes approches de cette problématique de l'unité des sciences, l'auteur défend, quant à elle, plusieurs conceptions pluralistes et, par la rigueur de ses analyses, nous offre un livre de référence sur le sujet.

→ **Thomas Lepeltier**
Oxford

Retrouvez l'intégralité de votre magazine
et plus d'informations sur
www.pourlascience.fr



PERMETTRE À **VOTRE ÉPARGNE DE FAIRE DES PETITS**
C'EST AUSSI ÇA LA GMF.

TBWA/PARIS



Une épargne performante et sûre pour préparer les projets de demain.
Avec les contrats d'assurance vie et les supports en euros de la GMF, vous vous constituez petit à petit une épargne performante qui vous permettra de financer tous vos projets d'avenir, en toute sécurité.

ÉPARGNE
3,05%*
TAUX SERVI EN 2012



Rendez-vous sur www.gmf.fr
ou appelez le

N° Vert 0 800 88 11 62
APPEL GRATUIT DEPUIS UN POSTE FIXE



Assurément Humain

*3,05 %, taux servi en 2012 : frais de gestion déduits et avant prélèvements sociaux pour tous les contrats d'assurance vie en euros de la GMF et les supports réguliers de Multéo et de Certigo. Les performances passées ne préjugent pas des performances futures.
GMF VIE - Société anonyme au capital de 179 676 528 € entièrement versé. Entreprise régie par le Code des assurances. R.C.S. Paris B 315 814 806 - Siège social : 76, rue de Prony - 75857 Paris Cedex 17 - Adresse postale : 1, rue Raoul Dautry - 95127 Ermont Cedex.

Avec plus d'1 million de Sociétaires, on peut déplacer des montagnes



Quand une banque tire sa force de l'esprit coopératif, elle s'appuie sur des valeurs de solidarité, d'écoute et de confiance. Créée par des enseignants, la CASDEN s'engage ainsi auprès de plus d'un million de Sociétaires à réinvestir leur épargne dans le financement des projets de chacun.

Rejoignez-nous sur casden.fr ou contactez-nous au **0826 824 400***

*Accueil téléphonique ouvert de 8h30 à 18h30 du lundi au vendredi (0,15€ TTC/min en France métropolitaine)



L'offre CASDEN est disponible
en Délégations Départementales et
également dans le Réseau Banque Populaire



CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture