

■ POUR LA

SCIENCE

Septembre 2011 - n° 407

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Vivre dans un monde quantique

Des effets quantiques
dans les objets
macroscopiques

Les insectes

Un réservoir de médicaments ?

Les mathématiques de la percolation

Un jeu de pavages aléatoires

Protéines désordonnées

Leur forme souple
multiplie leurs fonctions

M 02687 - 407 - F: 6,20 €



Allemagne : 9,36 € • Belgique : 7,60 € • Canada : 11,50 \$ • Can. Grèce : 8 € • DOM : 7,70 € • Italie : 7,60 € • Luxembourg : 7,60 € • Maroc : 63 MAD
TOM A : 1800 XPF • TOM S : 1000 XPF • Portugal : Cont. : 7,60 € • Suisse : 12,90 CHF • Tunisie : 7 TND

fatigue design 2011

23 et 24 novembre 2011 Senlis

*4^e édition du Congrès international
sur la conception vis-à-vis de la fatigue*



www.fatiguedesign.org

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-Géssipe, Bénédicte Salthun-Lassalle,
Cécile Fourrage

Dossiers Pour la Science

Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin

Rédacteur : Guillaume Jacquemont

Cerveau & Psycho

L'Essentiel Cerveau & Psycho

Rédactrice en chef : Françoise Pétry

Rédacteur : Sébastien Bohrer

Directrice artistique : Céline Lapert

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

Site Internet : Philippe Ribeau-Géssipe assisté de Ifédayo Fadoju

Marketing : Élise Abib

Direction financière : Anne Gusdorf

Direction du personnel : Marc Laumet

Fabrication : Jérôme Jalabert assisté de Marianne Sigogne

Presse et communication : Susan Mackie

Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé

Conseillers scientifiques : Philippe Boulanger et Hervé This

Ont également participé à ce numéro :

Patrice Berthet, Martin Blackledge, Eric Buffetaut,
Jean-François Dartigues, Damien Fabre, Martin Fussenegger,
Laurence Gesquière, Pierre Henry, Nadine Le Bris,
Jean-Michel Lecerf, Sonia Longhi, Jean-Yves Marion, Christophe
Pichon, Cyril Poupon, Daniel Tacquenet, Michael Zaslhoff.

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin

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

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Bouffaré. Tél. : 01 55 42 84 04

Espace abonnements :

http://tinyurl.com/abonnements-pourlascience

Adresse e-mail : abonnements@pourlascience.fr

Adresse postale :

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

Commande de livres ou de magazines :

0805 655 255 (numéro vert)

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

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

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

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

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

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

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou
francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents conte-
nus 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'adap-
tation 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-Augus-
tins - 75006 Paris).



Hasard et efficacité

Si les prix Nobel récompensent chaque année des personnes
« ayant apporté le plus grand bénéfice à l'humanité », par
leurs inventions ou découvertes, les prix Ig Nobel (cela se
prononce comme *ignoble* en anglais) sont décernés pour
des travaux qui, contrairement aux travaux scientifiques, « ne peuvent
ou ne doivent être reproduits ». Les prix Ig Nobel rendent hommage à
l'originalité et à l'imagination, ils font sourire et donnent à penser. C'est
le prix de médecine vétérinaire de 2009 décerné à l'équipe ayant mon-
tré que les vaches à qui l'on donne un prénom produisent plus de lait que
les autres ; ou encore celui de linguistique de 2007 pour avoir mis en évi-
dence que les rats sont le plus souvent incapables de distinguer la langue
japonaise de la langue néerlandaise dans un discours diffusé à l'envers...

Citons encore celui de management décerné à une équipe italienne
pour avoir démontré que, dans certaines organisations hiérarchiques,
l'efficacité augmenterait si les promotions des individus étaient faites...
au hasard. Leurs travaux explorent le principe de Peter selon lequel tout
employé s'élève dans une hiérarchie jusqu'à atteindre son niveau
d'incompétence : s'il est compétent, il est promu, mais finit par se
trouver confronté à une tâche pour laquelle il est... incompétent (*voir
Le principe de Peter, page 82*). Selon ce principe, le hasard est utile dans
certains domaines, par exemple dans la vie politique ou la justice.

Des régions où le hasard règne en maître...

Dans la Grèce antique, hasard et justice coexistaient déjà. Le *kle-
roterion* était un dispositif permettant de tirer au sort les jurés appe-
lés à rendre la justice. Cette stèle était entaillée de fentes où l'on glissait
le nom des jurés potentiels, lesquels étaient sélectionnés au moyen de
billes blanches (le nom était accepté) et noires (le nom était refusé)
tirées au hasard. La stèle utilisée représentait une sorte de pavage,
mais si la méthode reposait sur le hasard, le pavage ne l'était pas. Au
contraire, les mathématiciens étudient les pavages aléatoires notam-
ment dans les modèles dits de percolation, qui ont des applications inté-
ressantes en physique ou encore en biologie (*voir La percolation, un
jeu de pavages aléatoires, page 48*).

Le hasard est omniprésent en biologie, mais les biologistes en trou-
vent de nouveaux exemples. Ils ont longtemps cru que, pour remplir cor-
rectement leurs fonctions, les protéines devaient avoir une forme rigide.
Or ils découvrent aujourd'hui que certaines protéines contiennent des
régions ordonnées et d'autres où le hasard règne en maître. Et ils
comprennent que ce désordre rendrait plus efficaces les protéines
qui en sont dotées (*voir Le désordre intrinsèque des protéines, page 56*).
Et si ce résultat est un jour récompensé, cela ne sera certainement
pas par un prix Ig Nobel !

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

Actualités

- 6 Un nouveau satellite pour la Terre
 8 La cicatrisation efficace des dauphins
 10 Une hypophyse organisée
 13 Des diamants vieux comme la tectonique



... et bien d'autres sujets.

- 14 **ON EN REPARLE**

Opinions

- 16 **POINT DE VUE**
Épidémies à *Escherichia coli* : un avant-goût des « superbactéries » ?
Jean-Yves Madec
 17 **DÉVELOPPEMENT DURABLE**
Des carburants alternatifs pour les avions
Xavier Montagne
 19 **COURRIER DES LECTEURS**
 20 **VRAI OU FAUX**
Le petit déjeuner doit-il être copieux ?
Bénédicte Salthun-Lassalle

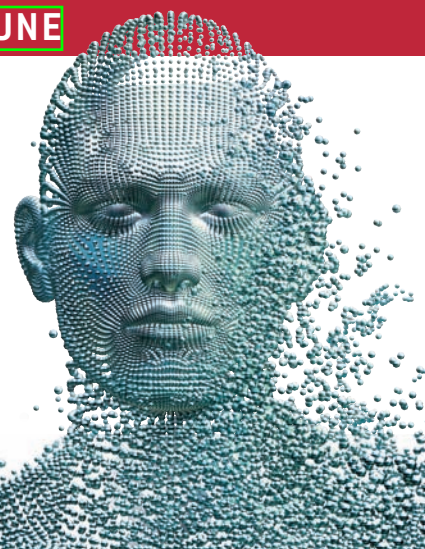
Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement
 Pour la Science brochés sur la totalité du tirage (p. 25 et 80) ;
 un encart *Courrier international* et un encart
 Editions Faton posés sur la quatrième de couverture
 de l'édition abonnés France.
 En couverture : © Kenn Brown, Mondoligthic Studios

À LA UNE

22 **PHYSIQUE** **Vivre dans un monde quantique**

Vlatko Vedral

La théorie quantique ne concerne pas seulement les électrons et les atomes. Elle s'applique aussi à plus grande échelle : aux oiseaux, aux plantes, voire aux humains.



30 **LINGUISTIQUE** **La langue façonne la pensée**

Lera Boroditsky

Les langues que nous parlons modifient notre façon de percevoir le monde et nos capacités cognitives.

36 **MÉDECINE** **Des insectes pour guérir**

Roland Lupoli

Depuis 5 000 ans, les insectes sont utilisés en médecine traditionnelle. En étudiant leurs principes actifs, des biochimistes mettent au point de nouvelles molécules thérapeutiques.

42 **PRÉHISTOIRE** **Les débuts de la culture en Europe**

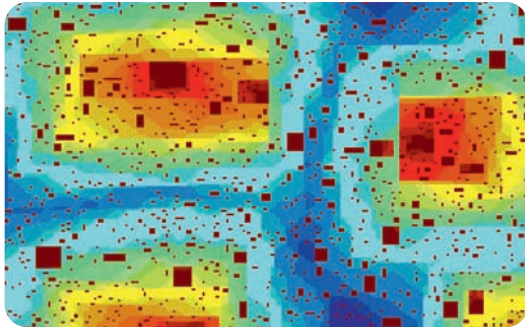
Michael Bolus et Nicholas Conard

Les grottes du Jura souabe, en Allemagne, ont livré des œuvres vieilles de 40 000 ans qui attestent d'une culture élaborée chez les premiers Européens anatomiquement modernes.



48 MATHÉMATIQUES**La percolation,
un jeu de pavages aléatoires***Hugo Duminil-Copin*

Dans les modèles de percolation, un réseau aléatoire est traversé d'un bout à l'autre. Ces modèles sont en lien étroit avec l'étude de la symétrie conforme, un champ très actif des mathématiques et de la physique théorique.

**56 BIOLOGIE CELLULAIRE****Le désordre intrinsèque
des protéines***A. Keith Dunker et Richard Kriwacki*

Selon les fonctions qu'elles accomplissent dans les cellules, les protéines présentent une conformation rigide ou, au contraire, très flexible. Les biologistes commencent à étudier le rôle des protéines « intrinsèquement désordonnées » dans diverses maladies.

**64 OCÉANOGRAPHIE****Abysses :
un empire méconnu***Craig McClain*

Loin d'être une étendue désertique, les grands fonds marins constituent un écosystème complexe : la faune très variée qui les peuple est directement tributaire du phytoplancton vivant en surface.

72 INFORMATIQUE**Plongés dans le noir
par un virus ?***David Nicol*

Des virus informatiques ont mis hors service certains systèmes de contrôle industriels. Le réseau électrique pourrait être la prochaine cible.

Regards**78****HISTOIRE DES SCIENCES****L'affaire de la gale :
histoire d'un concept
scientifique***Danièle Ghesquier-Pourcin*

Au XIX^e siècle, les médecins accusent un jeune docteur en médecine d'avoir falsifié ses travaux pour prouver l'existence du parasite de la gale. Leur argumentation révèle tous les obstacles qui les empêchaient d'envisager cette idée.

82**LOGIQUE & CALCUL****Le principe de Peter***Jean-Paul Delahaye*

La différence entre un texte humoristique et des travaux universitaires sérieux est parfois mince. Le principe de Peter est l'exemple même d'une loi dont le statut reste incertain.

88**ART & SCIENCE****Pollock et la dynamique
des fluides***Loïc Mangin***90****IDÉES DE PHYSIQUE****Des cerfs-volants
dans le vent***Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik***93****SCIENCE & GASTRONOMIE****Dépistons les odeurs***Hervé This***94****À LIRE**

Rendez-vous sur **POURLA SCIENCE.fr**

Plus d'informations

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

Les services en ligne

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

www.pourlascience.fr

→ L'HOMME A-T-IL UN PROPRE ?

Le rire. La conscience. La bipédie. Le langage. Avoir une théorie de l'esprit. Pratiquer des rites mortuaires... ou la guerre.

Si on voulait faire le catalogue des traits qui ont été proposés comme étant le propre de l'homme, on n'en finirait pas. En outre, ces propositions ont été à peu près toutes contestées, sinon réfutées. Le propre de l'homme est de chercher le propre de l'homme et de ne jamais le trouver !

Une question qui obtient trop de réponses sans qu'aucune n'emporte d'adhésion générale est sans doute mal posée. S'y aventurer, c'est donc risquer de s'engager dans des voies *a priori* faussées. Qui sait, alors, si nous ne devrions pas la mettre de côté ? Non qu'il faille faire de ce sujet un tabou, mais parce que, pour l'instant, il semble nous dépasser. Nous y verrions peut-être plus clair sur la question du propre de l'homme si nous la laissions informulée.

comme en tant d'autres, il révèle son inanité. Il peut démontrer que la France doit tenter d'extraire ce gaz, il peut démontrer qu'elle ne doit pas.

Si on estime que le danger majeur est la pénurie et la dépendance à l'égard de l'étranger, le principe de précaution commande d'explorer toutes les ressources, donc d'essayer d'extraire le gaz de schiste. Si on estime que le danger majeur réside dans le saccage de territoires et la contamination des réserves d'eau en vue d'une extraction qui, peut-être, ne sera pas rentable, voire impossible, le principe de précaution commande de s'abstenir.

Voici comment j'imagine la suite des événements. Les politiques amuseront la galerie avec le principe de précaution et autres fariboles du genre « Le risque zéro n'existe pas », qui peuvent justifier n'importe quelle décision aussi bien que n'importe quelle absence de décision. Pendant ce temps, les lobbies se battront, les uns pour l'extraction, les autres contre. Lequel obtiendra gain de cause ? Le meilleur manœuvrier.

→ PASSION PEU COMMUNICATIVE

Quand on s'intéresse vivement à un domaine, on admire les résultats qui y ont été obtenus, certes, mais l'excitation maximale naît plutôt des problèmes ouverts. On a envie de s'y confronter, on se passionne pour les perspectives que leur résolution ouvrirait. On aime mieux les questions que les réponses.

Quand on s'intéresse mollement à un domaine, on est curieux des exploits réalisés en son sein, et on l'est moins des problèmes en suspens. On veut bien se renseigner sur ce qui a été fait, on n'est pas prêt à se casser la tête sur des tentatives de résolution que, dès demain, les spécialistes écarteront peut-être comme vaines. On aime mieux les réponses que les questions.

Ainsi, le chercheur qui vulgarise sa science est astreint à un double désagrément. Il doit parler beaucoup de ce qui le motive le moins (les résultats), et peu de ce qui le motive le plus (les questions).

L'amoureux de littérature connaît le même genre de déboire. S'il tente d'intéresser des jeunes à quelque auteur (« Il me passionnait quand j'avais votre âge »), il leur paraît hors du coup, d'un sérieux sinistre. Son insistance risque d'avoir pour effet que ces jeunes assimilent la littérature à l'ennui, et s'en détournent. Nos aînés passaient pour de vieux birbes lorsqu'ils citaient Virgile dans le texte, et admiraient ses beautés. Nous passons pour ringards lorsque nous avouons que Racine a enchanté notre jeunesse. Nos cadets passeront pour des érudits poussiéreux lorsqu'ils évoqueront devant leurs enfants quelque épisode de *Harry Potter*.

Le plaisir est un des aspects de la vie qu'on a le plus envie de partager, et c'est un des aspects qui est le plus difficile à partager.



→ RISQUE ZÉRO

Si ça continue, nous allons devoir nous forger une opinion sur un sujet dont, jusqu'à peu, nous n'avions jamais entendu parler : l'extraction du gaz de schiste. Ne comptons pas sur le principe de précaution pour nous éclairer. En ce cas,



→ FAUX SENS

Le génie est une longue patience. Ayant plus du triple de l'âge qu'avait Évariste Galois lorsqu'il est mort, j'ai, à coup sûr, passé plus de temps au travail que lui, manifestant ainsi plus de patience, donc plus de génie.

Voilà ce qui s'appelle un raisonnement. Outre qu'il mène à une conclusion flatteuse pour moi, il dispense d'avoir à procéder à une laborieuse comparaison entre les œuvres...

Hélas, le plus beau raisonnement peut receler une faille. En l'occurrence, une mauvaise compréhension du verbe être. « Aest B »

n'équivaut pas toujours à « Best A ». Le génie est une longue patience ? Sans doute. Mais une longue patience n'est pas le génie.

→ PARCIMONIE CONSENTIE

« Il faut économiser l'énergie. » Ce mot d'ordre paraît aller de soi. Attention, pourtant ! Il risque de bousculer les libertés individuelles.

Prendre un bain tous les jours, consommer des monceaux de papier imprimé, partir en avion faire du tourisme, éclairer plus qu'il n'est indispensable, jeter un appareil en état de servir encore, manger des fruits exotiques, etc. : personne ne peut se flatter d'éviter tous ces travers. De quel droit m'interdire telle ou telle forme de gaspillage, alors que, peut-être, elle relève d'un besoin nécessaire à mon équilibre psychologique ? Qui va décider que, par exemple, se passer de voiture compense, ou non, la manie de changer de linge avant qu'il soit vraiment sale ? Une norme de comportement exigée de tous pourra être une grave frustration pour certains, mais ne rien coûter aux autres. Décréter que le gâchis engendré par les prospectus publicitaires est intolérable ? Soit. Seulement, il y a des gens qu'il fait vivre. Alors, s'il doit y avoir des mesures coercitives, sur quels critères les faire reposer ?

Je ne conteste pas qu'il faut gaspiller moins. Je dis que la parcimonie ne sera un bien que si elle est consentie à peu près librement. Ce sera une affaire de longue haleine.

Utilisez plutôt ceci, monsieur Tell, c'est plus intéressant au niveau du bilan carbone...



Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

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



La paléopathologie

Olivier Dutour

ISBN 978-2-7355-0750-4
160 p., ill. couleur, 15,5 x 20 cm
23 €

Ce petit volume n'est ni un manuel ni un traité. Son propos est d'aborder la paléopathologie, née dans le berceau de la préhistoire et de la paléontologie, de la rencontre des sciences médicales et archéologiques, sous la forme de réponses à dix questions simples. Il est destiné aux étudiants de master de différentes filières en sciences humaines, biologiques, médicales ou de l'environnement, désireux d'approfondir leurs connaissances dans le cadre de leur cursus ou simplement curieux de découvrir cette discipline particulière, et plus largement à tous ceux qui s'intéressent aux sciences du passé et de la santé.



Peuplements et préhistoire en Amérique

sous la direction de Denis Vialou

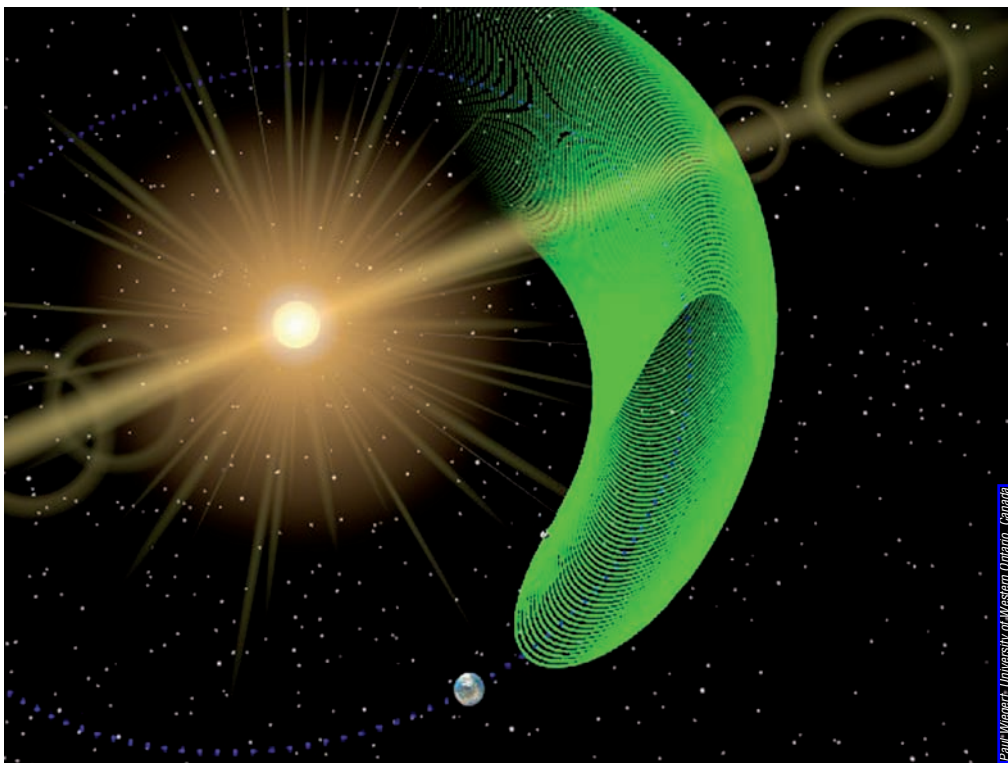
ISBN 978-2-7355-0751-1
492 p., ill. couleur, 21 x 27 cm
52 €

Cet ouvrage réunit les contributions de soixante préhistoriens de neuf pays, actuellement impliqués dans des recherches sur le terrain, de l'extrême nord du continent jusqu'à sa pointe australe. Plusieurs grandes problématiques y sont analysées : les peuplements, les cultures paléoindiennes en Amérique du Nord, les chasseurs-cueilleurs, les horticulteurs ou encore les peuples pêcheurs en Amérique du Sud, la technologie d'industries lithiques... Profondément diverse et originale par rapport à l'Ancien Monde, la préhistoire en Amérique révèle des comportements sociaux et économiques en union remarquable avec les milieux naturels variés de l'immense continent étiré dans les deux hémisphères. Elle témoigne de la créativité novatrice, accélérée, résolument moderne des *Sapiens* préhistoriques.

Astronomie

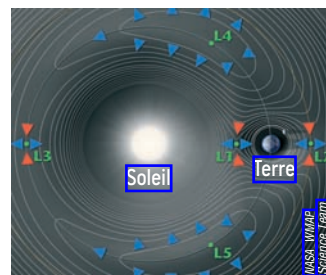
Un nouveau satellite pour la Terre

Le premier satellite troyen de notre planète a été découvert. Au vu de sa taille et de son éloignement, il ne fera pas d'ombre à la Lune...



Paul Weper, University of Western Ontario, Canada

Ci-contre, la trajectoire de l'astéroïde troyen 2010 TK7 (disque blanc) durant la prochaine centaine d'années (trajectoire verte), vue dans le repère héliocentrique tournant avec la Terre. Ce satellite est dit troyen, car il est en orbite autour du point de Lagrange L_4 , l'un des cinq points d'équilibre gravitationnel du système Terre-Soleil (ci-dessous). Un corps placé en un tel point tourne autour du Soleil à la même vitesse que la Terre. Seuls les points L_4 et L_5 sont stables, c'est-à-dire qu'un satellite peut rester dans leur voisinage indéfiniment.



Combien de satellites naturels possède la Terre ? Un seul, évidemment : la Lune. Mais la réponse est-elle vraiment aussi simple ? Plusieurs petits corps décrivent en effet des orbites autour du Soleil au même rythme que la Terre et à des distances équivalentes ; ils sont ainsi, en un certain sens, liés à notre planète. L'équipe de Martin Connors, de l'Université d'Athabasca au Canada, vient d'identifier le premier satellite de la Terre de ce type, dit « troyen ».

Les satellites troyens d'une planète parcourent en moyenne la même orbite que celle-ci autour du Soleil, mais sont en retard ou en avance de 60 degrés. Plus précisément, ils se situent près des « points de Lagrange » L_4 et L_5 , des points d'équilibre gravitationnel dans le système formé par la planète et le Soleil. Il existe trois autres

points de Lagrange : L_1 et L_2 , situés respectivement en avant et arrière de la planète sur l'axe qui la relie au Soleil, et L_3 , à l'antipode de l'orbite par rapport au Soleil. Un corps placé en l'un de ces points accompagne la planète au même rythme qu'elle dans sa course autour du Soleil. Les points L_4 et L_5 ont la particularité d'être stables : les satellites situés en ces points suivent ou précèdent constamment leur planète, sans jamais la croiser.

Depuis la découverte du premier satellite troyen de Jupiter, en 1906, on en a découvert pas moins de 4000 autour de Jupiter, deux pour chacune des lunes de Saturne Théty et Dionée, sept autour de Neptune et cinq autour de Mars. Les astronomes n'avaient pas encore déniché de satellites troyens de la Terre. Ils sont très difficiles à détecter, car ils se trouvent constamment dans une direction

apparente très proche du Soleil et sont noyés dans sa luminosité.

En fouillant les données du télescope spatial *Wise*, instrument dédié à la recherche des petits corps, M. Connors et ses collègues ont pourtant trouvé un astéroïde lié au point de Lagrange L_4 . L'objet, nommé provisoirement 2010 TK7, mesure environ 300 mètres de diamètre. Il a pu être détecté parce qu'il décrit une orbite relativement complexe autour de L_4 , s'écartant loin au-dessus et au-dessous du plan de l'orbite terrestre, et donc de l'éclat apparent du Soleil. Il se trouve actuellement à 80 millions de kilomètres de notre planète, et les astronomes ont calculé que, au moins pour les 10000 prochaines années, il ne s'approchera pas de la Terre à moins de 24 millions de kilomètres.

→ Philippe Ribeau-Gésippe
Nature, vol. 475, pp. 481-483, 2011

Le stress d'être chef



La position hiérarchique
de ce mâle babouin dominant
est stressante – plus qu'il n'y paraît.

Les babouins vivent en groupes qui comptent de 10 à 200 individus des deux sexes et de tous âges. Leurs sociétés sont hiérarchisées : un mâle dit alpha domine, fort de l'appui des autres mâles qui reconnaissent son autorité. Les mâles dominants se reproduisent plus et ont un accès prioritaire à la nourriture. On pensait qu'ils étaient donc moins stressés que les mâles de rang inférieur. Ce ne serait pas le cas selon Laurence Gesquiere, de l'Université Princeton, et ses collègues.

Les biologistes ont suivi pendant neuf ans cinq groupes de 125 babouins jaunes (*Papio cynocephalus*), dans le bassin d'Amboseli au Kenya. Ils ont montré que les mâles alpha sécrètent davantage de glucocorticoïdes – des hormones produites en cas de stress – que les mâles bêta (mâles situés juste au-dessous dans la hiérarchie, car ils s'accouplent parfois). Le niveau de stress des mâles alpha est semblable à celui des mâles de plus bas rang, probablement parce que pour dominer la communauté et se reproduire est aussi coûteux en énergie que de chercher en permanence des ressources, comme le font les mâles de bas rang.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

L. R. Gesquiere et al., *Science*, vol. 333, pp. 357-360, 2011

La naissance violente des États au Pérou

Lorsqu'on pense aux peuples qui ont précédé les Européens au Pérou, les Incas, voire les Mochicas, sont les premiers qui viennent à l'esprit. Pourtant, beaucoup les ont précédés. Charles Stanish, de l'Université de Californie à Los Angeles, et sa collègue s'intéressent aux premières proto-cités installées autour du lac Titicaca et ont retracé l'histoire de la région : les conflits armés ont joué un rôle majeur dans le développement des premiers États.

À partir de 1400 avant notre ère, plusieurs groupes de chasseurs-cueilleurs se sédentarisent autour du plan d'eau et établissent les premiers villages. Certains grossissent et deviennent des centres politiques régionaux. Pendant près de 1 000 ans, les conflits sont rares.

Toutefois, à partir de 500 avant notre ère, l'iconographie montre que le paysage politique change : on voit désormais des individus valorisés pour leurs exploits militaires et les premières têtes décapitées en guise de trophées.

À la fin du I^{er} millénaire avant
notre ère, deux grands centres



Le lac Titicaca, au Sud du Pérou.

politiques dominent la région, Taraco et Pukara. Le dernier finira par diriger seul toute la zone. Comment ? Les fouilles montrent qu'une grande partie des centres résidentiels de Taraco a brûlé à la fin du I^{er} siècle, entraînant un ralentissement durable de l'activité économique. Or cet incendie n'était pas accidentel. Outre son étendue, on n'a retrouvé aucune trace d'une éventuelle reconstruction. De plus, l'événement a

coïncidé avec l'accension de Pukara au statut de force politique dominante dans la région. De cet épisode, Ch. Stanish conclut que les conflits ont été un facteur important dans l'évolution des États archaïques dans le Nord du lac Titicaca. Cet exemple s'ajoute à ceux déjà documentés de la Mésopotamie, de la Més-Amérique, du Nord du Pérou...

→ Loïc Mangin

Ch. Stanish et A. Levine, PNAS, en ligne, 2011

En bref

HÉPATITE C : VERS UN VACCIN

Une équipe européenne a conçu une nouvelle stratégie pour un vaccin contre l'hépatite C. Elle a construit des pseudoparticules virales chimériques en greffant sur un rétrovirus de souris, privé de son matériel génétique, des protéines du virus de l'hépatite C. En injectant ces particules à des souris et des macaques, les biologistes ont constaté la production d'anticorps neutralisants, qui peuvent bloquer différents sous-types du virus de l'hépatite C.

ÉMISSIONS DE BARRAGES

Les réservoirs hydroélectriques émettraient six fois moins de gaz à effet de serre qu'on ne le pensait : 48 millions de tonnes de dioxyde de carbone par an. Des chercheurs brésiliens, américains, suédois et canadiens ont comparé les émissions de gaz à effet de serre de 85 réservoirs hydroélectriques répartis sur toute la planète. Ces émissions ne sont pas homogènes : elles décroissent avec l'âge et la latitude des barrages, les plus hauts niveaux étant atteints par les réservoirs de la région amazonienne.

LES EAUX DE MARS

De l'eau liquide sur Mars ? C'est ce que pensent avoir détecté Alfred McEwen, de l'Université de l'Arizona, et ses collègues. Ils ont repéré dans les images de la sonde *Mars Reconnaissance Orbiter*, sur des sites des latitudes moyennes, des centaines de stries sombres qui « s'écoulent » le long des pentes abruptes. Elles sont visibles de la fin du printemps au début de l'automne. Autant de caractéristiques qui évoquent des écoulements d'eau liquide. Reste que, faute d'analyses directes, cette nouvelle détection restera tout aussi hypothétique que les précédentes.

En bref

LES MONTAGNES DE LA LUNE

Pourquoi la face cachée de la Lune est-elle couverte de montagnes alors que la face visible est formée de plaines basses ? À cause d'une collision avec une autre lune, proposent Martin Jutzi et Eric Asphaug, de l'Université de Californie. L'impact entre la Terre et un corps de la taille de Mars qui a formé la Lune aurait aussi créé un autre petit satellite. Les chercheurs ont simulé sa rencontre avec la Lune à peine refroidie : une collision assez lente aurait permis à la matière du second satellite de s'accréter sur l'hémisphère caché de la Lune.

GÉNOME DE CORAIL

Le génome du corail bâtisseur de récif *Acropora digitifera* vient d'être séquencé par les équipes australienne et japonaise de David Miller et Nori Satoh. Les biologistes ont identifié parmi ses quelque 24 000 gènes des marqueurs du mode de vie symbiotique de cet animal. Le corail vit en effet en symbiose avec une algue photosynthétique, nommée zooxanthelle. Par cette association, le corail stimule la photosynthèse de l'algue et celle-ci lui fournit des nutriments, tout en favorisant la formation de son squelette calcaire.



Le faible niveau d'instruction, le tabagisme, l'inactivité physique, la dépression, l'hypertension, l'obésité et le diabète semblent augmenter le risque de développer la maladie d'Alzheimer.

Physiologie

La cicatrization efficace des dauphins

La blessure était longue de 30 centimètres et profonde de trois centimètres. Pourtant, le dauphin a guéri rapidement sans s'infecter, et ce dans l'eau... Les dauphins cicatrisent étonnamment bien. Selon Michael Zasloff, de l'Université Georgetown près de Washington, cette faculté serait due à des agents antibactériens concentrés dans la couche adipeuse de la peau.

Depuis longtemps, les biologistes marins s'étonnent de la vitesse à laquelle les dauphins guérissent des blessures infligées par les requins. Ces blessures, pourtant exposées à de nombreux pathogènes dans l'eau, ne s'infectent pas. En observant le rétablissement de spécimens de l'espèce *Tursiops truncatus*, M. Zasloff a avancé quelques hypothèses pour expliquer les mécanismes de cicatrization chez ces animaux.

La peau des mammifères marins est composée d'un mince épiderme, reposant sur le derme et séparé des muscles par une épaisse couche de cellules graisseuses. Cette dernière remplit plusieurs fonctions, telles que l'isolation thermique et la transmission acoustique.

M. Zasloff s'est intéressé à cette couche adipeuse, la seule composante de la peau des dauphins qui diffère de celle des mammifères terrestres. Elle contient des organohalogènes (des composés organiques contenant un atome de fluor, chlore, brome ou iode) dont certains, d'origine naturelle, sont connus



Jour 1



Jour 22



Jour 40

Guérison d'un dauphin gravement blessé par un requin. En 40 jours, la blessure a cicatrisé sans infection.

→ Cécile Fourrage

M. Zasloff, *Journal of Investigative Dermatology*, en ligne, 21 juillet 2011

Neurosciences

Alzheimer : sept facteurs de risque

La maladie d'Alzheimer est une pathologie neurodégénérative qui se caractérise par des troubles de la mémoire et une démence. Dans le monde, 33,9 millions de personnes en souffrent, chiffre qui devrait tripler dans les 40 ans à venir. Bien que certains facteurs génétiques existent, Deborah Barnes et Kristine Yaffe, de l'Université de Californie à San Francisco, ont montré que sept facteurs, la plupart liés au style de vie, sont associés au risque de développer la maladie.

En analysant la littérature scientifique portant sur de nombreux patients atteints, les deux chercheuses ont estimé le nombre

de cas aujourd'hui attribuables à chaque facteur de risque supposé.

Le principal facteur, représentant 19 pour cent des cas, serait le faible niveau d'instruction. L'activité intellectuelle serait en effet un facteur protecteur. Puis viendraient le tabagisme (14 pour cent des cas), l'inactivité physique (13 pour cent des cas), la dépression (11 pour cent), l'hypertension (5 pour cent), et enfin l'obésité et le diabète (2 pour cent chacun). Ensemble, ces sept facteurs de risque participeraient à environ la moitié des cas dans le monde.

En outre, grâce à un modèle mathématique, D. Barnes et K. Yaffe ont calculé le nombre de

cas qui pourraient être évités en diminuant ces facteurs. Une réduction de 25 pour cent éviterait plus de trois millions de cas ; une diminution de seulement 10 pour cent réduirait de 1,1 million le nombre de cas.

Bien sûr, d'autres facteurs de risque peuvent être impliqués, et l'on n'a pas encore prouvé de lien de cause à effet entre ces facteurs et l'apparition de la maladie. Certains facteurs, telles la dépression et l'inactivité physique, peuvent être des conséquences précoces de la maladie et non des causes.

→ B. S.-L.

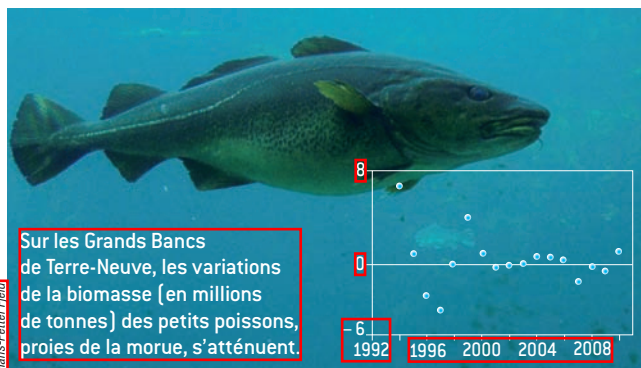
The Lancet Neurology, en ligne, 19 juillet 2011

Écologie

Le retour de la morue ?

Les morues des Grands Bancs de Terre-Neuve reviendraient enfin, annoncent les biologistes de l'Institut Bedford en Nouvelle-Écosse. Au début des années 1990, l'effondrement de leur population jusqu'à moins de cinq pour cent de leur niveau initial a entraîné un moratoire sur la pêche de la morue. Mais 15 ans après, la morue n'était toujours pas revenue. En revanche, les effectifs des grands invertébrés marins et des espèces de poissons planctonivores (lançons du Nord, harengs, capelans...) ont explosé. Sans doute parce que ces organismes étaient les proies des morues. En outre, depuis qu'elles ne sont plus chassées par les morues, ces espèces de faible longévité voient leurs populations osciller saisonnièrement : chaque année, elles augmentent avec la prolifération du zooplancton, puis, une fois celui-ci consommé, elles déclinent très vite. Dans les années 1990, ces oscillations étaient très fortes. Or les biologistes ont remarqué qu'elles s'atténuent d'année en année. La cause probable ? Le renouveau de la prédation par les morues...

→ François Savatier

K. T. Frank et al., *Nature*, en ligne, 27 juillet 2011

Biologie animale

Des mâles obsolètes

Gardez l'essentiel, débarrassez-vous du superflu. Cette injonction est suivie à la lettre par la cochenille australienne *Icerya purchasi*, sauf que chez cet insecte, le superflu, ce sont les mâles ! Cette espèce est haplodiploïde (fécondé, un ovule se développe en femelle ; sinon, en mâle). Or certaines femelles peuvent féconder leurs ovules avec les spermatozoïdes contenus dans un tissu particulier qui a été précédemment laissé par un mâle. Or ce tissu se transmet d'une génération à l'autre, de mère en fille – une sorte d'hermaphroditisme acquis. Ce tissu héritable procure un avantage au père, car il féconde à la fois la mère et ses descendantes, ce qui augmente la transmission de ses gènes. Qu'en est-il de la mère ? Andy Gardner, de l'Université d'Oxford, montre que l'hermaphroditisme est aussi avantageux pour la femelle (à l'inverse de ce que l'on pensait auparavant), car elle conserve l'ensemble de ses gènes familiaux au sein de sa lignée. C'est une mauvaise nouvelle pour les mâles, déjà rares, qui sont vraisemblablement condamnés à disparaître...

→ L. M.

A. Gardner et L. Ross, *American Naturalist*, vol. 178, pp. 191-201, 2011

Géophysique

La chaleur radioactive de la Terre chiffrée

Depuis sa formation il y a 4,5 milliards d'années, la Terre évacue peu à peu sa chaleur résiduelle et se refroidit. Néanmoins, de la chaleur continue d'être produite dans ses entrailles, le manteau terrestre en particulier, par la radioactivité d'isotopes instables – principalement l'uranium 238, le thorium 232 et le potassium 40. Quelle part représente aujourd'hui cette radioactivité dans le flux de chaleur relâché vers l'espace ? La collaboration KamLAND, qui regroupe plus de 60 chercheurs japonais et américains autour du détecteur d'antineutrinos *Kamioka*, au Japon, apporte pour la première fois une estimation quelque peu précise de cette contribution calorifique.

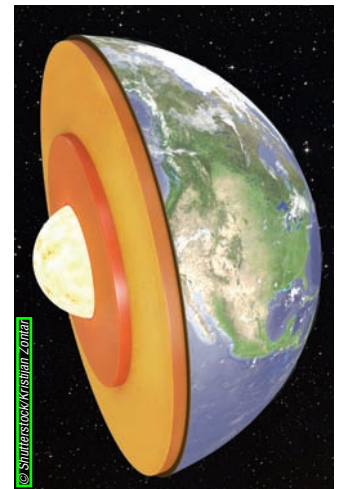
On sait que la Terre évacue vers l'espace une puissance totale de 44,2 térawatts, à 1 térawatt près. La part due à la radioactivité était mal connue, car son calcul nécessitait de faire des hypothèses précises sur la composition interne du globe (proportions des différents éléments et de leurs isotopes, leur répartition spatiale, etc.). Le comptage des neutrinos émis dans les chaînes de désintégrations radioactives est un moyen un peu plus direct et moins théorique de mesurer la chaleur terrestre produite par radioactivité. En effet, les neutrinos interagissent très peu avec la matière et traversent donc la planète de part en part sans pertes ou presque. La difficulté est de les détecter, condition *sine qua non* pour les dénombrer et ainsi évaluer l'énergie totale dégagée par la radioactivité terrestre.

La collaboration KamLAND a utilisé les données du détecteur *Kamioka* recueillies entre 2002 et 2009 (au total environ 110 « géoneutrinos » détectés), ainsi que les mesures effectuées par *Borexino*, un autre détecteur de neutrinos, en Italie. Elle en a déduit que les désintégrations de l'uranium et du

thorium produisent 20 térawatts, à quelque 9 térawatts près. Si l'on ajoute la radioactivité due au potassium 40, dont on sait par ailleurs qu'elle produit 4 térawatts (les neutrinos qu'elle émet sont hors du domaine de sensibilité de *Kamioka* et de *Borexino*), on arrive à un total de 24 térawatts de chaleur radioactive (à 9 térawatts près).

Ces résultats prouvent que la radioactivité ne rend pas compte à elle seule de la chaleur terrestre, et que la Terre n'a pas fini d'évacuer sa chaleur initiale. Ils sont par ailleurs utiles pour affiner les modèles géologiques et géophysiques de l'intérieur de notre planète, mais les scientifiques auraient besoin de résultats plus précis. Cela nécessiterait la mise en place d'autres détecteurs de géoneutrinos en divers endroits du globe.

→ Maurice Mashaal

A. Gando et al. (The KamLAND Collaboration), *Nature Geoscience*, en ligne, 17 juillet 2011

La Terre évacue 44 térawatts, ou 44 000 gigawatts, de chaleur. L'estimation du nombre de neutrinos émis par le globe a permis d'établir que près de la moitié de cette chaleur est due à la radioactivité naturelle, principalement de l'uranium 238, du thorium 232 et du potassium 40 contenus dans le manteau et la croûte terrestres.

Évolution

L'origine des tortues

Les tortues sont-elles plus proches des crocodiles ou des lézards ? La question restait en suspens. Une analyse génétique effectuée par Tyler Lyson, de l'Université Yale à New Haven, et ses collègues indique qu'elles sont de lointaines cousines des lézards.

Les paléobiologistes ont étudié dans le génome des tortues et des lézards les microARN, des molécules qui modulent l'expression des gènes. Les microARN se développent assez vite chez une espèce au cours du temps, mais, une fois présents, ils demeurent presque inchangés. Ils fournissent ainsi une carte moléculaire qui permet de retracer l'évolution d'une espèce. Les chercheurs ont trouvé 77 nouveaux microARN chez les lézards, dont quatre existent chez les tortues, mais chez aucune autre espèce ; preuve que les tortues sont proches des lézards sur l'arbre de l'évolution.

→ B. S.-L.

T. Lyson et al., *Biology Letters*, en ligne, 20 juillet 2011



La tortue serait plus proche du lézard que du crocodile sur l'arbre de l'évolution.

© Shutterstock/William M. Keane

Ethologie

Les lions et la pleine lune

En Tanzanie, avant de flâner le soir dans la savane, mieux vaut consulter ses éphémérides : selon les phases de la lune, les risques de finir au dîner d'un lion varient dans un rapport de un à quatre ! Craig Packer, de l'Université du Minnesota, a étudié quelque 500 attaques qui ont eu lieu entre 1988 et 2009 et les a comparées au calendrier lunaire. Précisons que la plupart des assauts ont eu lieu quand les humains sont les plus actifs, entre le crépuscule et 22 heures.

Les lions attrapent plus facilement leurs proies bipèdes les nuits qui suivent la pleine lune. Pour quelles raisons ? Lors de la lune ascendante, notre satellite éclaire le ciel avant que le Soleil ne soit couché. Ainsi, l'obscurité n'est jamais totale. En revanche, après la pleine lune, l'astre se lève après la tombée de la nuit. Les félins profitent alors de quelques heures sans lumière pour chasser les villageois. Ils les attaquent d'autant plus qu'ils attrapent moins de proies quadrupèdes lors des nuits claires. Les lions sont donc particulièrement en appétit après la pleine lune !

→ L. M.

C. Packer et al., *PLoS ONE*, vol. 6(7), e22285, 2011

Neurobiologie

Une hypophyse organisée

Nichée dans une cavité osseuse, à la base du cerveau, pend une glande : l'hypophyse, reliée à l'hypothalamus par la tige pituitaire. Cette glande produit de nombreuses hormones qui contrôlent, en stimulant d'autres glandes, diverses fonctions telles que la croissance, la lactation, l'ovulation...

On pensait que l'hypophyse était une mosaïque aléatoire de cellules productrices d'hormones. Les travaux conjoints de l'équipe de Jacques Drouin, de l'Institut de recherches cliniques de Montréal, et de celle de Patrice Mollard, du Département d'endocrinologie de l'Institut de génomique fonctionnelle (CNRS UMR 5203, INSERM U661, Universités de Montpellier 1 et 2), ont montré qu'en fait, cet organe est très organisé.

Les chercheurs se sont intéressés à la partie antérieure de l'hypophyse, l'antéhypophyse, qui produit cinq types d'hormones. À l'aide de techniques d'imagerie en trois dimensions, ils ont suivi deux catégories de cellules (occupant chacune environ dix pour cent de la glande). D'une part, celles qui produisent des hormones corticotropes (elles ont pour cibles les glandes surrénales), telle l'ACTH ; d'autre part, celles qui fabriquent les hormones gonadotropes (dont

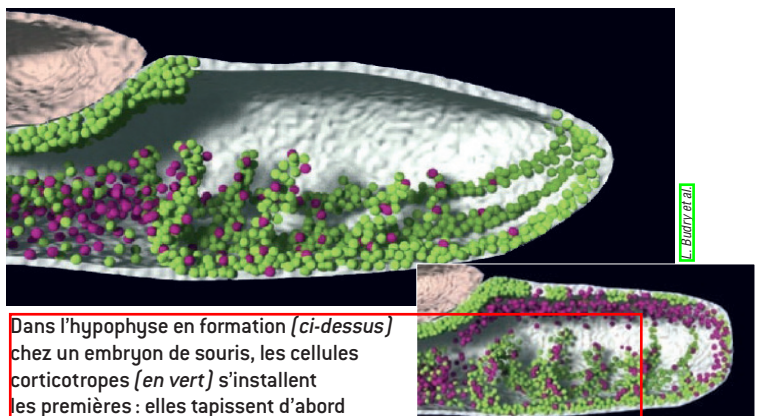
les cibles sont les glandes sexuelles), notamment la LH et la FSH. La mise en place de ces cellules suit un scénario bien précis.

Les cellules corticotropes apparaissent sur la surface ventrale de l'hypophyse, puis s'agencent en digitations qui s'étendent vers l'intérieur, l'ensemble ressemblant un peu à un peigne. Au final, les cellules s'installent loin des microvaisseaux sanguins de la glande (par où seront libérées les hormones) : elles établissent des contacts avec ces capillaires grâce à des prolongements de leur cytoplasme.

Les cellules gonadotropes se différencient plus tard et remplissent les espaces entre les cellules corticotropes et les vaisseaux sanguins. Des expériences ont révélé que le développement des cellules gonadotropes n'a lieu qu'après la mise en place des cellules corticotropes et en contact intime avec ces dernières. Lorsque l'hypophyse est formée, chaque catégorie de cellules est organisée en un réseau continu : cette structure où les cellules d'un même type sont en contact favorise très certainement leur fonctionnement. Ces résultats obligent déjà à revoir nos connaissances sur la biologie de cet organe.

→ L. M.

L. Budry et al., *PNAS*, vol. 108, pp. 12515-12520, 2011



Dans l'hypophyse en formation (ci-dessus) chez un embryon de souris, les cellules corticotropes (en vert) s'installent les premières : elles tapissent d'abord la face ventrale de l'organe, puis élaborent des protubérances en forme de doigts [on parle de digitations]. Viennent ensuite les cellules gonadotropes (en violet) qui, chez l'adulte (à droite), s'organisent au contact des cellules corticotropes.

© Budry et al.

Paléontologie humaine

Néandertaliens submergés par *Homo sapiens*

Bientôt sept milliards d'hommes sur Terre. *Homo sapiens* continue à se multiplier et le fera, semble-t-il, jusqu'aux limites de la planète. Les travaux de Paul Mellars et Jennifer French, de l'Université de Cambridge en Grande-Bretagne, suggèrent que cette tendance à la prolifération existait déjà lorsque les hommes modernes ont remplacé les Néandertaliens d'Eurasie, entre 40 000 et 30 000 ans avant notre ère.

En Europe occidentale, trois cultures ont coexisté et se sont succédé durant la transition Néandertaliens-*Homo sapiens* : celles du Moustérien de tradition acheuléenne (~300 000 à ~30 000 ans) et du Châtelperronien (~38 000 à ~32 000 ans), attribuées aux Néandertaliens ; et celle de l'Aurignacien (~37 000 à ~28 000 ans), attribuée à l'homme moderne.

Les deux chercheurs ont voulu mesurer l'évolution de ces populations au cours de la transition dans un carré de 75 000 kilomètres carrés centré sur la Dordogne. Ils ont estimé les nombres d'abris sous roches et de stations en plein air, ainsi que l'intensité d'occupation des sites. Alors que les Néandertaliens n'ont habité qu'une soixantaine de sites, les hommes

modernes de culture aurignacienne qui leur succèdent en ont occupé 150. Par ailleurs, les Néandertaliens occupaient sur chaque site 100 à 250 mètres carrés, contre 500 à 600 mètres carrés pour les Aurignaciens. Déduites des nombres d'os animaux retrouvés dans chaque mètre carré de strate correspondant à un millénaire, les masses moyennes de viandes consommées avaient par ailleurs été multipliées par 1,8 à l'époque aurignacienne ; il en est de même pour le nombre moyen d'outils lithiques utilisés.

Ainsi, l'augmentation de la surface des sites suggère que la population de chaque site a doublé ou triplé lors de la transition. Le nombre de sites documentés a été multiplié par environ 2,5, et l'intensité d'occupation par un facteur 1,8. Par conséquent, les Aurignaciens auraient été environ dix fois (entre $2 \times 2,5 \times 1,8$ et $3 \times 2,5 \times 1,8$) plus nombreux que leurs prédécesseurs néandertaliens. La transition entre Néandertaliens et hommes modernes a d'abord été une transition démographique...

→ F. S.

P. Mellars et J. C. French, *Science*, vol. 333, pp. 623-627, 2011

En bref

ÉPIDERME ÉLECTRONIQUE

Dae-Hyeong Kim, de l'Université de l'Illinois, et ses collègues aux États-Unis, à Singapour et en Chine, ont mis au point des membranes électroniques ultramincées qui adhèrent à la peau grâce aux seules forces de Van der Waals. Ces films de polymère épais de 30 micromètres peuvent intégrer des composants variés : capteurs (mécaniques, électrophysiologiques, de température, etc.), des transistors, des diodes électroluminescentes, des cellules photovoltaïques, etc. Souples, ils épousent parfaitement le relief de la peau, sans aucune gêne pour le porteur. À la clef : des dispositifs de surveillance médicale et, plus généralement, les interfaces homme-machine.



LES { Partagez les savoirs } RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

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

COURS PUBLICS

Cycle « Histoire de la chimie » par B. Bodo, Ch. Lehman, D. Fauque
Jeudi 15 septembre – 18h : La Chimie au Jardin du Roy et au Muséum, une histoire naturelle
Jeudi 22 septembre – 18h : Les cours de chimie en France au siècle des Lumières
Jeudi 29 septembre – 18h : De l'analyse à la synthèse : l'essor de la chimie organique au XIX^e siècle et ses principaux apports à la société

Grand Auditorium du Muséum
57 rue Cuvier, Paris 5^e – Métro : Jussieu

UN CHERCHEUR/UN LIVRE

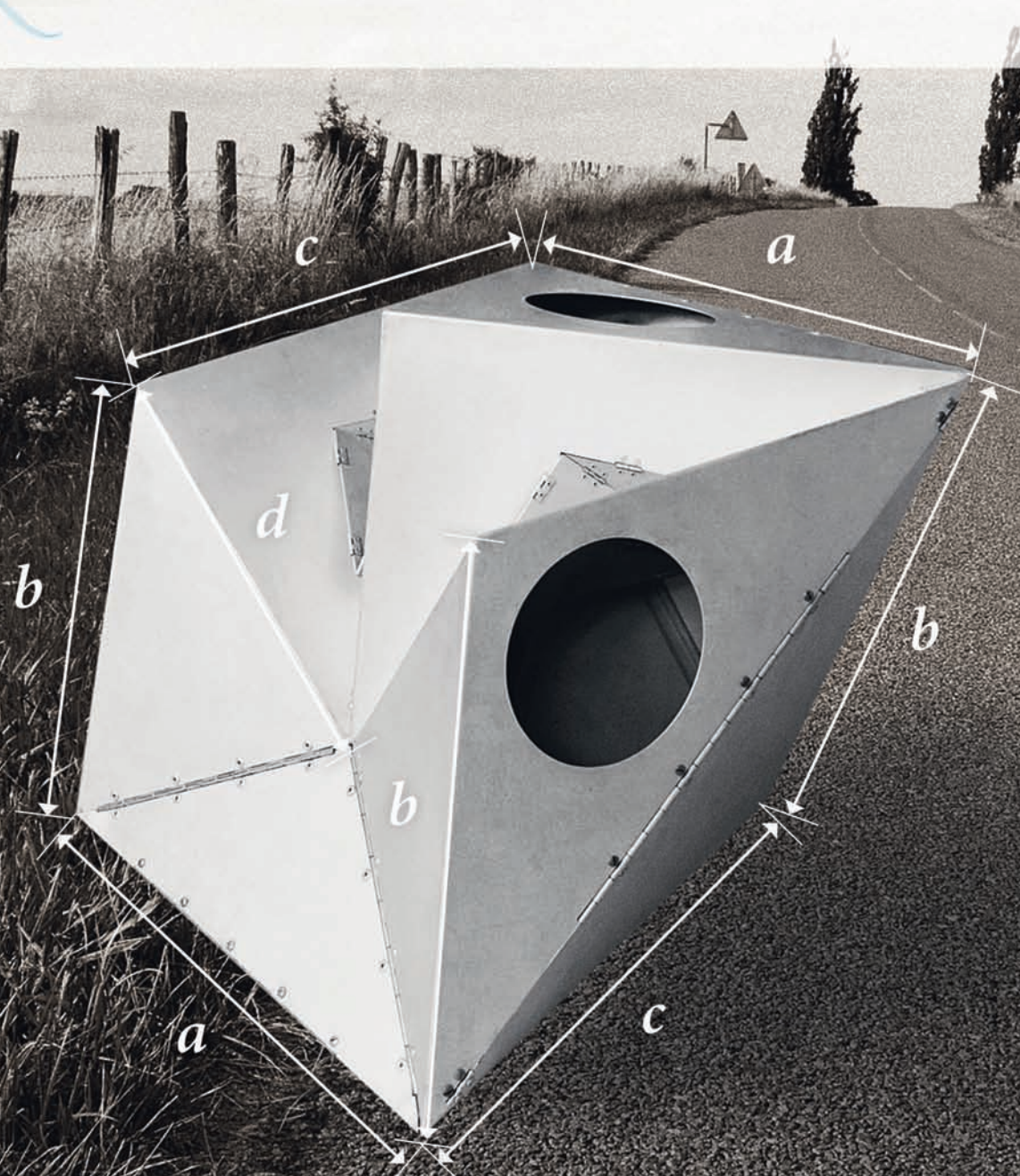
Spéciale Journées du patrimoine
Dimanche 18 septembre – 15h : conférence-dédicace par Françoise Serre et Manuel Cohen : *Les statues du Jardin des Plantes* - Éd. du Muséum.

FILMS

Rétrospective Jean Painlevé « Le cinéma au cœur du vivant »
Auteur de plus de 200 films issus tant de la recherche scientifique que de l'esprit rebelle de l'avant-garde, Jean Painlevé a consacré sa vie à une radiographie luxuriante et joyeuse de l'infiniment petit.
Lundi 19 septembre – 18h
Samedi 24 septembre – 15h30
Lundi 26 septembre – 18h

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





LE TOUR DE FRANCE

DU 26 SEPTEMBRE 2011
AU 30 JUIN 2012

DES

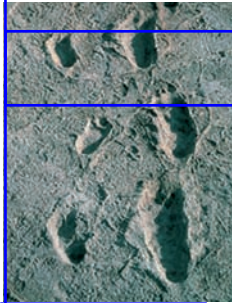
DÉCHIFFREURS

VOYAGE EN MATHÉMATIQUES

LYON / MARSEILLE / MONTPELLIER / STRASBOURG / NANCY / RENNES / ORLÉANS / MAUBEUGE /
JEUMONT / VALENCIENNES / DOUAI / ROUBAIX / CASSEL / ARMENTIÈRES / LILLE / BORDEAUX / PAU / TOULOUSE

Paléontologie humaine

Un petit pas pour l'humanité



Empreintes fossilisées à Laetoli, en Tanzanie.

Depuis combien de temps le pied humain est-il doté de ses caractéristiques (voûte plantaire, appui avec l'avant du pied et surtout le gros orteil...) ? L'étude d'empreintes de pied figées dans la cendre cimentée à Laetoli, en Tanzanie, avait fourni une date : au plus deux millions d'années, aux débuts du genre *Homo*. Les travaux de Robin Crompton, de l'Université de Liverpool, en Grande-Bretagne, et de ses collègues (dont ceux à qui l'on doit la première datation) ont réévalué cette estimation à 3,7 millions d'années. Les 11 empreintes, analysées à l'aide de techniques issues de l'imagerie cérébrale, seraient celles d'un *Australopithecus afarensis*, l'espèce dont fait partie Lucy.

→ L. M.

R. Crompton et al., *J. R. Soc. Interface*, prépublication en ligne, 2011

Neurosciences

Grosse tête pour vieux singes

Chez l'homme âgé, le volume de certaines régions du cerveau diminue. Mais on ignore si c'est le cas chez d'autres espèces. Des anthropologues, des neurobiologistes et des primatologues américains ont mesuré, en imagerie par résonance magnétique, le volume du cerveau de 69 chimpanzés âgés de 10 à 51 ans, et l'ont comparé à celui de 87 hommes adultes âgés de 22 à 88 ans. Ils ont notamment examiné la taille du néocortex (la couche la plus externe du cerveau), du lobe frontal et de l'hippocampe.

Si ces structures diminuent avec l'âge chez l'homme, elles conservent le même volume chez les chimpanzés. Toutefois, lorsque les chercheurs ont réduit l'échantillon humain pour avoir une durée de vie équivalente à celle des chimpanzés, ils n'ont plus observé d'atrophie des structures cérébrales chez l'homme. Cette différence d'évolution cérébrale serait liée à la différence de longévité entre les deux espèces, et la diminution de volume cérébral n'interviendrait chez les êtres humains que dans la tranche de vie gagnée par rapport aux chimpanzés.

→ B. S.-L.

C. C. Sherwood et al., *PNAS*, en ligne, 25 juillet 2011

Géophysique

Des diamants vieux comme la tectonique

Il y a 4,5 milliards d'années, la Terre se forme. Très vite, le feu qui couve à l'intérieur met le manteau en mouvement et la planète se couvre d'une croûte, qui accueille dans ses creux de l'eau où naît la vie. Mais les océans ne datent pas de plus de trois milliards d'années : Steven Shirey, de la *Carnegie Institution* de Washington, et Stephen Richardson, de l'Université du Cap, ont montré que c'est à cette époque que s'enclenchent les cycles de Wilson, terme qui désigne le ballet des continents à la surface de la Terre sous l'influence de la convection sous-jacente.

Ces mouvements de convection fragmentent les continents, les dispersent, puis les rassemblent en un supercontinent, avant de recommencer. Comme ce processus dure 400 à 600 millions d'années, on pensait que 8 à 12 cycles de Wilson s'étaient succédé en 4,5 milliards d'années.

En fait, il y en aurait eu moins, cinq ou six. S. Shirey et S. Richardson ont étudié les datations de 4000 inclusions au sein de diamants provenant de cratons hérités de cinq anciens continents. Les cratons sont de très anciens fragments épais de croûte continentale, qui ont la particularité d'être prolongés par des « quilles » plongeant jusqu'à 200 kilomètres. Là, la pression est assez élevée pour que se forment des diamants. Transportés en surface par le volcanisme, ces diamants y apportent des inclusions minérales anciennes.

Celles-ci sont formées soit de péridotite, la roche mantellique de base, soit d'éclogite, roche créée lors de la plongée (subduction) d'une plaque océanique dans le manteau, donc au cours d'un cycle de Wilson. Les chercheurs ont constaté qu'au-delà d'un âge de 3,2 milliards d'années, toutes les inclusions sont formées de péridotites. Explication la plus simple : la première subduction s'est produite il y a 3,2 milliards d'années au plus. Ce serait l'âge de la tectonique.

→ F. S.

Science, vol. 333, pp. 434-436, 2011



Stephen H. Richardson, Université du Cap

Cette inclusion de péridotite dans un diamant de deux millimètres de diamètre provenant du craton d'Udachnaya, en Sibérie, a probablement été conservée pendant plusieurs milliards d'années.

DERNIÈRE minute ...

LES SAVANES-FORÊTS DE NOS ORIGINES

Nos ancêtres sont-ils devenus bipèdes parce qu'ils ont investi la savane ? Cerling Thure, de l'Université de l'Utah, a un élément de réponse à cette question. À partir de clichés satellitaires, son équipe a relié l'intensité lumineuse reçue par un sol au rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Elle en a déduit que plus des deux tiers des sols ayant livré des fossiles humains étaient peu arborés (les arbres

couvrant moins de 40 pour cent de la surface) au cours des six derniers millions d'années.

TRANSPORT SUR RÉSEAU IRRÉGULIER

Izaak Neri et deux collègues, à l'Université Montpellier 2, ont montré sur un modèle de trafic qu'un réseau irrégulier, où le nombre de routes qui se croisent dans une jonction est aléatoire, conduit à des routes soit à forte densité de cir-

culution, soit à faible circulation. Dans un réseau régulier, en revanche, le trafic est uniformément dense. Des résultats surprenants, utiles par exemple à l'étude du trafic routier ou à celle du transport des protéines au sein d'une cellule.



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

Retour sur des sujets déjà traités dans nos colonnes

→ LA LUMIÈRE ACTIVE DES GÈNES

Depuis une dizaine d'années, une nouvelle technique, l'optogénétique, associe les outils de l'optique et de la génétique pour contrôler l'activité électrique de neurones *in vivo*. On insère dans des cellules cérébrales de souris le gène codant une opsine, un canal ionique activé par la lumière, de sorte que l'opsine y est synthétisée. Sous l'effet de la lumière, le canal opsine s'ouvre et laisse entrer des ions dans les neurones, ce qui modifie leur activité électrique (voir *Les neurones sous l'emprise de la lumière*, *Pour la Science*, mars 2011, www.pourlascience.fr/u.php?s=oer401). Haifeng Ye, à Bâle en Suisse, et ses collègues suisses et français étendent la technique à n'importe quelle cellule en utilisant une protéine de l'œil, la mélanopsine, qui s'ouvre quand une lumière bleue l'éclaire (*Science*, juin 2011). Dans la cellule, ce canal laisse entrer des ions calcium, qui provoquent une cascade de signalisation aboutissant à la production d'un facteur nommé NFAT. Les biologistes ont introduit le gène codant la mélanopsine dans des cellules en culture, ainsi qu'un autre gène, inséré de façon à pouvoir être activé par NFAT. Les gènes étudiés sont ceux de la glycoprotéine SEAP humaine et d'une autre protéine, shGLP-1, qui régulent la glycémie, la concentration de sucre dans le sang. Ainsi, chaque gène était contrôlé par la mélanopsine, via le facteur NFAT. Les biologistes ont greffé de telles cellules modifiées à des souris diabétiques, sous la peau ou dans l'abdomen avec une fibre optique délivrant de la lumière bleue. En éclairant réguliè-



Une lumière bleue éclaire des souris : les cellules greffées produisent alors des molécules de régulation de la glycémie.

→ L'HOMME A-T-IL UNE BOUSSOLE NATURELLE ?

Certains animaux, par exemple les tortues marines, perçoivent le champ magnétique terrestre et l'exploitent pour s'orienter. Si l'on ignore en grande partie comment ils font, on sait que ces animaux ont, dans des structures particulières, des nanocristaux de magnétite dont l'organisation dépend du champ magnétique. Et la lumière interviendrait aussi chez des espèces migratoires : en étant captée par une protéine particulière de l'œil, le cryptochrome, la lumière engendrerait des réactions chimiques intervenant dans la sensibilité magnétique (voir *Des boussoles chez les animaux*, *Pour la Science*, octobre 2006, www.pourlascience.fr/u.php?s=oer348). Qu'en est-il chez l'homme ? La protéine cryptochrome 2 existe dans la rétine humaine. Pour tester si cette molécule engendre une sensibilité magnétique dépendant de la lumière, Lauren Foley, de l'Université du Massachusetts aux États-Unis, et ses collègues ont créé des mouches (*drosophiles*) transgéniques ne possédant pas leur cryptochrome (qui leur permet de s'orienter avec le champ magnétique), mais exprimant la protéine humaine. Les mouches restent sensibles au champ magnétique et l'utilisent pour s'orienter, preuve que la protéine humaine confère une sensibilité, faible cependant, au champ magnétique. Reste à savoir si l'homme l'utilise...

rement les souris pendant 48 heures (voir *la photo*), les scientifiques ont constaté une amélioration de leur glycémie après l'injection de sucre. Preuve que les protéines de régulation ont été produites sous l'effet de la lumière bleue.

→ NOUVEAUX REGARDS

SUR LE MÉGASÉISME JAPONAIS

En mars dernier, le quatrième plus grand séisme jamais enregistré, au Nord-Est du Japon, provoque un raz de marée gigantesque atteignant 20 mètres de haut à certains endroits. Les conséquences : plus de 20 000 victimes et un désastre nucléaire. Personne ne s'attendait à un séisme de magnitude 9 dans cette région du Japon. Si l'on n'a pas pu prévoir un tel séisme, on en tire aujourd'hui des leçons (voir *Le mégaséisme de subduction du Japon*, *Pour la Science*, mai 2011, www.pourlascience.fr/u.php?s=oer403). Notamment, trois groupes de chercheurs, principalement japonais et américains, apportent un éclairage scientifique sur ces rares mégaséismes (*Science*, juin 2011). Chacun utilise des méthodes différentes, mais les résultats sont cohérents. D'une part, une zone de très fort mouvement sur le plan de faille est iden-

tifiée en mer, près de la fosse du Japon. Une équipe japonaise présente des mesures de déplacement du fond de la mer qui atteignent 24 mètres horizontalement et trois mètres verticalement, quatre fois plus que ce qui a été mesuré sur la côte. Il s'agit des premières mesures de ce type jamais réalisées en mer. Les calculs effectués par l'équipe du Caltech à partir du GPS terrestre et des enregistrements du tsunami indiquent un mouvement sur la faille dépassant 50 mètres à certains endroits, ce qui est un record. Cependant, il reste possible que la partie Sud du plan de faille joue à nouveau. La troisième étude reconstitue l'histoire de la rupture en s'appuyant sur le dense réseau de sismomètres et d'accéléromètres installé au Japon. La rupture s'est effectuée en plusieurs étapes : elle s'est développée d'abord en profondeur, s'est élargie près de la fosse jusqu'à 60-70 secondes, puis ne s'est poursuivie qu'en profondeur au-delà de 100 secondes. Ces deux dernières études concluent que les ondes sismiques de haute fréquence, à l'origine des secousses ressenties à terre, proviennent de la partie profonde du plan de faille, et non de la zone de déplacement maximal. Cette zone proche de la fosse est à l'origine du tsunami, mais reste relativement silencieuse, ce qui peut poser problème pour une alerte précoce.

→ Bénédicte Salthun-Lassalle

■ POUR LA SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

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

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



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

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

POINT DE VUE

Épidémies à *Escherichia coli* : un avant-goût des « superbactéries » ?

La bactérie 0104:H4, responsable des épidémies récentes en Allemagne et en France, est à la fois virulente et résistante aux antibiotiques. Combien de temps ces médicaments seront-ils encore efficaces face à de telles bactéries ?

Jean-Yves MADEC

On considère souvent qu'une bactérie ne peut être à la fois virulente et résistante aux antibiotiques, car chacune de ces propriétés représente un coût énergétique notable. On pense ainsi qu'une bactérie très virulente est rarement résistante aux antibiotiques, et *vice versa*. Même si l'équilibre des coûts est une constante biologique, la réalité est moins manichéenne.

La bactérie *Escherichia coli* conforte cette idée. Commensale de l'homme, cette espèce vit la plupart du temps dans les intestins sans provoquer de dommages. En revanche, certaines souches peuvent acquérir un arsenal de gènes qui leur confèrent de nouvelles propriétés, par exemple de virulence. Les souches d'*E. coli* entérohémorragiques en sont un exemple : elles sont responsables de pathologies graves, voire mortelles, chez l'homme. Cependant, ces souches ne sont en général pas résistantes aux antibiotiques. En conséquence, les souches entérohémorragiques multirésistantes 0104:H4, récemment en cause dans les épidémies allemande et française, semblent faire exception.

Pourtant, les exemples de bactéries virulentes et résistantes ne manquent pas. Chez l'homme, bon nombre de souches engendrant des septicémies – des infections graves de l'ensemble de l'organisme – sont résistantes aux antibiotiques, parfois même aux dernières générations de médicaments. Et c'est bien parce qu'elles sont

à la fois virulentes et résistantes que la communauté médicale s'inquiète. Chez l'animal, la situation est semblable : plus de 80 pour cent des souches d'*E. coli* impliquées dans les diarrhées du veau sont résistantes à plusieurs antibiotiques.

Dès lors, pourquoi les bactéries *E. coli* entérohémorragiques seraient-elles à l'abri d'une colonisation par des gènes de résistance ? Peut-être parce que l'usage des antibiotiques est déconseillé pour traiter ces infections ; en effet, plusieurs études mon-

LES ANTIBIOTIQUES PEUVENT provoquer une libération de toxines bactériennes dans l'organisme, ce qui aggrave l'état du malade.

trient que ces molécules peuvent provoquer une libération de toxines bactériennes dans l'organisme, ce qui aggrave l'état du malade. Et comme une utilisation trop importante des antibiotiques favorise l'« antibiorésistance », on a sans doute jusqu'à présent limité l'émergence de souches entérohémorragiques multirésistantes en évitant de traiter ces infections par les antibiotiques... Mais il semblerait que ce ne soit plus le cas.

En effet, d'une part, une bactérie est tout à fait capable d'équilibrer sa dépense énergétique en étant à la fois virulente et résistante. Et, d'autre part, la plupart des gènes de virulence et de résistance sont portés par des structures moléculaires

mobiles et transférables d'une bactérie à l'autre. C'est la somme des coûts biologiques dus à l'acquisition de ces gènes qui en détermine la stabilité dans la bactérie.

Ainsi, la bactérie 0104:H4 a sans doute acquis au cours du temps, à partir d'une bactérie *E. coli* entéroagrégate (ce type de souches peut s'agréger dans les intestins, ce qui favorise sa virulence), le gène codant la toxine Shiga de type 2 et celui codant la résistance étendue aux bêta-lactamines (une large classe d'antibiotiques).

Le premier est porté par un bactériophage, un virus n'infectant que les bactéries et y insérant des gènes ; le second provient d'un plasmide, une molécule d'ADN circulaire qui peut être transmise entre cellules. Plus rarement, certains plasmides transfèrent même à la fois des gènes de

résistance et des gènes de virulence.

Ainsi, les conditions et les vecteurs nécessaires pour qu'une bactérie soit virulente et résistante aux antibiotiques existent bien. Les liens entre ces fonctions peuvent être illustrés chez la plupart des espèces commensales ou pathogènes. Dans les années 1990, pour ne donner qu'un exemple, une vaste épidémie de salmonellose chez l'homme et les bovins a été attribuée à la dissémination massive d'une souche particulière (*Salmonella typhimurium*), portant une région génétique (*Salmonella Genomic Island 1*) responsable de sa multirésistance, mais aussi suspectée de participer à sa virulence accrue.

En conséquence, le succès épidémiologique d'une bactérie résulte d'une combinaison de situations favorables à son implantation dans le milieu à conquérir (et ce à un coût acceptable). Ainsi, certaines bactéries importantes en pathologie humaine montrent non seulement de réelles aptitudes à la virulence, mais peuvent aussi, comme la bactérie *Pseudomonas aeruginosa*, adhérer aux parois pulmonaires, profiter de l'immunodéficience ou d'infections déjà présentes chez l'hôte, et devenir vite résistantes aux antibiotiques.

Dès lors, si le succès écologique d'un clone bactérien repose sur un cocktail de fonctions complémentaires, peut-on considérer que la bactérie virulente et résistante 0104:H4 est annonciatrice de « superbactéries » plus fréquentes ? Certes, elle présente l'originalité d'une souche *E. coli* entérohémorragique mul-

tirésistante et dotée de facteurs entéro-agrégatifs. Mais elle pose surtout des questions sur la séquence des événements ayant conduit à cette association, ainsi que sur les rôles possibles de l'homme, de l'animal et de l'environnement.

On sait aujourd'hui que les multiples activités humaines (mondialisation et accélération des échanges) créent probablement des pressions de sélection complexes et mal maîtrisées, qui favorisent les événements participant à l'apparition des « superbactéries ». Parce que les outils de caractérisation génomique sont devenus rapides, puissants et acceptables en termes de coût, ils améliorent aussi notre compréhension des épidémies. Il aurait été impensable, il y a encore peu, de disposer en quelques semaines de la séquence génomique complète d'une bactérie pathogène. Et c'est bien

cette carte d'identité rapidement établie qui a confirmé qu'une « superbactérie » peut combiner virulence et résistance.

Toutefois, si ces outils nous permettent d'identifier rapidement les coupables, nous aident-ils pour autant à les maîtriser ? La récente crise révèle à nouveau l'expansion des bactéries multirésistantes et la nécessité de limiter l'usage des antibiotiques qui en favorise précisément la sélection. Si la surconsommation des antibiotiques (par l'homme et l'animal) perdure, l'émergence d'autres « superbactéries » est à prévoir.

Jean-Yves MADEC est directeur de recherche et responsable de l'Équipe Antibiorésistance et virulence bactériennes, à l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses - site de Lyon).

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

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Des carburants alternatifs pour les avions

Le domaine du transport aérien s'achemine vers l'utilisation de carburants non fossiles.

Xavier MONTAGNE

Pour les acteurs du transport, la diversification des ressources énergétiques, le contrôle et la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la réduction des émissions polluantes sont des priorités. Et cela tant pour des raisons économiques qu'opérationnelles, environnementales ou réglementaires.

L'impact actuel de l'aviation mondiale en matière de rejets de dioxyde de carbone est modéré : sa consommation de pétrole ne représente qu'environ 8 pour cent de la consommation totale, et 2,5 pour cent des émissions anthropiques de dioxyde de carbone. Cependant, cet impact pourrait doubler à l'horizon 2020 avec l'accroissement prévisible du trafic aérien, estimé à environ cinq pour cent par an. De plus, le transport aérien fera dès 2012 son entrée dans

les mécanismes européens de permis d'émission de dioxyde de carbone.

Les carburants aéronautiques proviennent aujourd'hui presque exclusivement du pétrole. Or ce dernier risque de coûter de plus en plus cher et les émissions de dioxyde de carbone doivent être réduites. Aussi, le domaine du transport aérien a déjà commencé son adaptation aux défis des carburants alternatifs. Mais l'utilisation de ces derniers y est encore faible et souvent expérimentale. Elle doit en effet répondre à de nombreux critères très stricts, portant par exemple sur la sécurité et sur la compatibilité chimique avec le carburant conventionnel (les substituts ne doivent pas affecter les caractéristiques et les performances du carburant final, approche dite *Drop in fuel*). Toutefois, la certification de produits alter-

natifs est une réalité ; certains le sont déjà en mélange, et de nouvelles certifications sont en cours d'élaboration.

Tous secteurs confondus, il existe plusieurs alternatives aux carburants conventionnels. Citons d'abord les hydrocarbures de synthèse de type GtL (*Gaz to Liquid*, hydrocarbures obtenus par synthèse à partir du gaz naturel) ou CtL (*Coal to Liquid*, hydrocarbures obtenus à partir du charbon). Viennent ensuite les biocarburants de première génération – éthanol, biodiesel –, dont les procédés sont aujourd'hui matures, ainsi que les biocarburants issus d'un hydrotraitement (traitement à l'hydrogène) poussé d'huiles végétales, dits HVO (*Hydrotreated Vegetable Oils*). Ces derniers sont majoritairement constitués d'hydrocarbures aux propriétés voisines de

IRD Éditions Institut de recherche pour le développement

Un éditeur pour le développement

Guide des serpents d'Afrique occidentale
Savane et désert
Jean-François Trape, Youssouph Mané
IRD Éditions
J.-F. TRAPE, Y. MANÉ
228 p. 29 €

Les serpents d'Afrique occidentale et centrale
Jean-Pierre Chippaux
IRD Éditions
J.-P. CHIPPAUX
312 p. 28 €

Venins de serpent et envenimations
Jean-Pierre Chippaux
IRD Éditions
J.-P. CHIPPAUX
288 p. 28 €

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

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

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

Diffusion libraires : Eyrolles/Géodif
Vente par correspondance : IRD Diffusion
32, av. Varagnat - F 93143 Bondy cedex
Tél : 01 48 02 56 49 Fax : 01 48 02 79 09
diffusion@ird.fr
www.ird.fr

celles des hydrocarbures de synthèse. Des procédés industriels sont disponibles ou en passe de l'être. De plus, une large réflexion est en cours sur les ressources envisageables pour alimenter cette filière (si la ressource est constituée de microalgues lipidiques, on parle alors de biocarburants de troisième génération).

Les biocarburants de deuxième génération, eux, sont obtenus à partir de bois ou de déchets végétaux selon deux procédés. L'un, biochimique, conduit à de l'éthanol ; l'autre, thermochimique, donne des hydrocarbures dits BtL (*Biomass to Liquid*), comparables aux GtL et CtL. Des travaux sont également menés sur la pyrolyse directe de la biomasse, qui permet d'obtenir des carburants liquides sans passer par une phase de gazéification.

Un cahier des charges très exigeant

Par ailleurs, de nouveaux développements faisant appel à des procédés biologiques pour produire des hydrocarbures sont en cours. On peut notamment citer la transformation des sucres en hydrocarbures, comme celle proposée par la Société Amyris, aux États-Unis et au Brésil. Tous ces hydrocarbures recevront ensuite un traitement complémentaire pour obtenir des molécules paraffiniques adaptées à un carburant aéronautique. Enfin, le gaz naturel ou l'hydrogène constituent une autre filière alternative.

Mais les contraintes du transport aérien restreignent beaucoup les choix. En effet, les carburants pour l'aéronautique sont formulés dans un cadre réglementaire très strict et certaines spécifications (le contenu énergétique, qui détermine le rayon d'action des avions, la tenue au froid ou à la chaleur, la stabilité au stockage, les propriétés lubrifiantes, l'explosivité, etc.) constituent des verrous. Par ailleurs, les produits doivent assurer une combustion propre, être disponibles partout dans le monde, disposer d'un bilan global d'émission de gaz à effet de serre favorable et satisfaire au concept de *Drop in fuel*.

Certaines filières se trouvent ainsi écartées, tels les biocarburants de première génération (l'éthanol en raison de son

contenu énergétique plus faible et de son explosivité, le biodiesel en raison de son comportement au froid, du risque d'instabilité et d'un contenu énergétique légèrement inférieur) et les carburants gazeux (gaz naturel, hydrogène).

Ainsi, à court et moyen termes restent en course les hydrocarbures de synthèse de type GtL ou CtL (mais qui n'améliorent pas les bilans d'émissions de gaz à effet de serre, comparés au carburant aéronautique classique), les biocarburants BtL, dont les procédés de fabrication sont en développement et ne devraient pas atteindre l'échelle industrielle avant 2020, les biocarburants HVO et les produits issus de la transformation des sucres, en cours de développement et dont les travaux de certification ont débuté.

Ces filières conduisent à des hydrocarbures paraffiniques exempts de composés aromatiques et de soufre qui, après une opération d'hydro-isomérisation et une optimisation des formulations, peuvent être utilisés en mélange dans des carburants conventionnels, avec de bons bilans de rejets de dioxyde de carbone.

Les substituts GtL, CtL, BtL et HVO sont déjà certifiés pour être mélangés à hauteur de 50 pour cent au carburant usuel et de nombreuses expérimentations ont été mises en œuvre par la plupart des acteurs (Boeing, Airbus, EADS, Air-France, Lufthansa, etc.). Le récent Salon aéronautique du Bourget, où un espace spécifique était dédié à ces carburants, a confirmé l'intérêt qu'on leur porte.

À plus long terme, des carburants tels que le gaz naturel ou l'hydrogène sont évoqués. Mais cela exigera de repenser entièrement tant la conception des avions que les circuits d'approvisionnement et de distribution, la logistique et la sécurité. Par exemple, le projet *Cryoplane* d'un appareil utilisant de l'hydrogène liquide, coordonné par Airbus Industrie et financé par la Commission européenne, exigera sans doute plus de 20 ans de recherche et développement pour aboutir.

Xavier MONTAGNE est directeur adjoint de la Direction scientifique de IFP Énergies nouvelles, à Rueil-Malmaison.



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

✓ LES FARINES ANIMALES FONT PEUR

Le point de vue de Jeanne Brugère-Picoux *Farines animales : faut-il les réintroduire ?* (*Pour la Science* n° 406 - août 2011, <http://bit.ly/pls406-farines>) a suscité de nombreuses réactions. La plupart manifestent une incompréhension quant au fait de nourrir les ruminants, des herbivores, avec des produits d'origine animale, qu'ils soient « sains » ou non. D'autres réactions posent la question de savoir s'il est judicieux de recourir aux farines alors que l'on produit et consomme déjà trop de viande, mobilisant notamment une large part des surfaces agricoles mondiales pour l'alimentation animale, au détriment de l'alimentation humaine.

→ RÉPONSE DE J. BRUGÈRE-PICOUX

L'article incriminé pose la question de la réintroduction des farines animales. Cette réintroduction ne concernerait pas les ruminants, mais d'autres espèces animales qui n'ont jamais été touchées par des maladies à prions, à savoir les porcs et les volailles. Nourrir les ruminants avec des produits animaux n'est donc pas mon propos. Mais puisque les lecteurs évoquent ce point, il faut souligner que l'apport de produits animaux à des ruminants a débuté dès la fin du XIX^e siècle. L'explication, très répandue pendant la crise de la vache folle, selon laquelle la maladie résulte de ce que « l'on a rendu les vaches carnivores » est donc inexacte et a induit en erreur l'opinion publique, en édulcorant la vraie raison de la crise, qui était la contamination des farines anglaises du fait d'un recyclage intra-espèce. Les farines animales étant en grande partie obtenues à partir des ruminants, ce « cannibalisme » doit être évité.

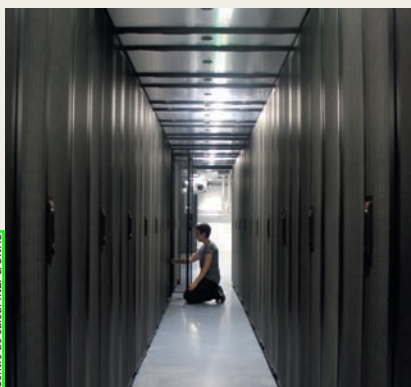
La question de la surproduction de viande appelle des éléments de réponse variés, en particulier économiques. Un point déterminant est l'équilibre entre l'offre et la demande. Or cette demande est en constante augmentation. Contrairement à ce que laisse sous-entendre un lecteur, la France n'est pas en situation d'excès de production et pour certaines filières, par exemple

la filière avicole, elle doit importer et devra importer de plus en plus dans le futur.

✓ PARC INFORMATIQUE : ÇA CHAUFFE !

Dans son article *La gestion énergétique des salles informatiques* (*Pour la Science* n° 406 - août 2011, <http://bit.ly/pls406-informatique>), Dominique Boutigny mentionne la technique *in row* où l'air chaud est rejeté dans des couloirs confinés qui séparent des rangées d'armoires informatiques. Pourquoi est-il plus économe de refroidir un petit espace très chaud (les couloirs) et un grand espace peu chaud (le reste de la salle) que de refroidir un espace global (salle et couloirs) tiède ?

Arthur Legrand



Dans la technique *in row*, l'air chaud est rejeté entre les rangées d'ordinateurs.

→ RÉPONSE DE DOMINIQUE BOUTIGNY

Il est très difficile, voire impossible, de climatiser efficacement une grande salle de machines dans laquelle les multiples serveurs sont autant de sources de chaleur. La distribution des températures est difficilement prévisible et, surtout, se modifie lorsqu'on ajoute ou déplace des machines. La seule façon pour lutter contre ces points chauds est de forcer le fonctionnement des climatisations, ce qui n'est pas économique et conduit à une modification des équilibres thermiques. Au bout du compte, le comportement thermique de la salle devient instable, et source de problèmes.

En revanche, traiter le volume limité des couloirs séparant deux rangées de serveurs est relativement simple et efficace. Cela permet en outre de mettre en place des redondances sur les unités de climatisation, assurant ainsi une bonne sécurité au système. Ayant supprimé les points chauds, il est alors aisé et peu coûteux de climatiser le restant de la salle. Avec le système *in row*, il est possible de régler les températures au plus juste afin d'optimiser le rapport entre la puissance électrique totale de la salle et la puissance utile pour l'informatique.

✓ COMPLEXES OCTONIONS

Il y a une petite inexactitude dans l'article *Des octonions pour la théorie des cordes* (*Pour la Science* n° 406 - août 2011, <http://bit.ly/pls406-octonions>). Contrairement à ce qui est indiqué, ce n'est pas à Jérôme Cardan en 1454 que l'on doit la première introduction des nombres complexes, mais à Nicolas Chuquet, dans son ouvrage *Triparty en la science des nombres*, rédigé en 1484. L'ouvrage *La Construction des Nombres* (Éditions Ellipses, 2000) complètera utilement l'historique et la compréhension des nombres évoqués dans l'article.

P. Bruter

✓ LE TRAITEMENT DU MÉLANOME

Dans l'encadré sur les cancers de la peau de l'article *Comment l'ADN réagit au soleil* (*Pour la Science* n° 406 - août 2011, <http://bit.ly/pls406-adn>), il est dit qu'il « n'existe aujourd'hui aucun traitement efficace contre les mélanomes ». L'auteur a dû oublier de préciser qu'il parlait des mélanomes ayant déjà métastasé. En effet, la chirurgie constitue actuellement un traitement efficace, car elle permet de guérir une grande proportion de ces tumeurs, qui ne deviennent redoutables que si leur exérèse n'a pas pu être assez précoce. D'où la nécessité d'un dépistage régulier.

Jacques Legroux, dermatologue

VRAI OU FAUX

Le petit déjeuner doit-il être copieux ?

Oui, c'est préférable, car il favorise les performances intellectuelles et limiterait la prise de poids. Mieux vaut ne pas sauter ce repas souvent convivial.

Bénédicte SALTHUN-LASSALLE

Le petit déjeuner rompt le jeûne nocturne et apporte à l'organisme de l'énergie. Est-il nécessaire ? Doit-il être copieux ?

En France, le petit déjeuner est copieux et « équilibré » depuis le début du XX^e siècle. Et il est toujours d'actualité : quel que soit l'âge, la plupart des Français consomment un petit déjeuner. Ce repas est parfois pris seul, avant neuf heures du matin, mais 80 pour cent des enfants le partagent en famille. Son importance dans l'apport énergétique journalier (compris entre 2 000 et 2 500 kilocalories selon l'âge, le sexe et l'activité physique) diminue avec l'âge, passant de 22 pour cent avant 12 ans à 17 pour cent à l'âge adulte. Or différentes études scientifiques suggèrent que le petit déjeuner doit être copieux et bien composé, car il favorise alors un équilibre alimentaire correct, une meilleure gestion du poids et de bonnes performances intellectuelles.

Un petit déjeuner équilibré comporte une boisson – du lait et des jus de fruit pour les plus jeunes, une boisson chaude pour les adultes –, du pain (avec du beurre et de la confiture) ou des céréales, en particulier pour les enfants. En moyenne, le petit déjeuner représente entre 15 et 20 pour cent des apports quotidiens d'énergie. Or les experts en nutrition recommandent une contribution du petit déjeuner à hauteur de 25 pour cent de l'apport énergétique total. En effet, différentes études, dont une réalisée dans le Val-de-Marne en 1996 et une autre publiée en 2001, montrent que les adultes consommant un petit déjeuner copieux ont un équilibre nutritionnel sur la journée plus proche des recommandations, c'est-à-dire

varié (présentant toutes les classes d'aliments), riche en fibres et en vitamines. Ces personnes, surtout les femmes, auraient aussi moins de risques de surpoids et d'obésité : un petit déjeuner copieux diminuerait le grignotage et la consommation excessive d'aliments riches aux deux autres repas. Et il favoriserait la satiété et une bonne régulation de l'appétit.

Un meilleur équilibre alimentaire

En outre, les enfants prenant un petit déjeuner consomment plus de fruits et de légumes, et pratiquent plus d'activités physiques. En moyenne, ils ont un indice de masse corporelle plus faible que celui des autres enfants. Toutefois, un petit déjeuner copieux s'accompagne d'apports énergétiques quotidiens plus importants (il ne permet donc pas de maigrir). Cet effet serait compensé par une meilleure hygiène de vie, des repas plus équilibrés et davantage d'activités physiques.

Par ailleurs, plusieurs études réalisées chez l'enfant et chez l'adulte montrent que la consommation d'un petit déjeuner améliore les aptitudes cognitives et l'état psychologique. Pour quelle raison ? Notamment parce que le petit déjeuner augmente la quantité de sucre circulant dans l'organisme, la première source d'énergie des cellules... et des neurones. Ainsi, les enfants qui prennent un petit déjeuner seraient plus attentifs en classe, moins stressés, moins anxieux et de meilleure humeur que les autres.

En revanche, bien qu'une étude réalisée en 2003 avec des enfants scolarisés à Madrid ait souligné l'importance de la qualité du



petit déjeuner (qui doit comporter des produits laitiers et du pain ou des céréales) sur les capacités intellectuelles et de raisonnement, Jean-Michel Lecerf, du Service de nutrition à l'Institut Pasteur de Lille, précise « qu'on ne peut pas émettre de recommandations sur la taille et la composition du petit déjeuner idéal, si tant est qu'un idéal commun à tous soit envisageable ».

En résumé, un petit déjeuner à base de produits céréaliers et laitiers est préférable à l'absence de ce repas, que ce soit pour l'équilibre alimentaire de la journée ou les performances intellectuelles. Les nutritionnistes recommandent un repas représentant plus de 20 pour cent des apports de la journée, mais des études supplémentaires seront nécessaires pour le confirmer. D'autant qu'il est illusoire de faire manger 400 ou 500 kilocalories à un enfant chaque matin ! En tout cas, si des enfants et des adolescents boudent le petit déjeuner, sachez qu'ils le prendront plus volontiers si leurs parents font de même.

Bénédicte SALTHUN-LASSALLE est journaliste à Pour la Science.

J.-M. Lecerf et al., *Petit déjeuner, est-ce utile ?*, Cahiers de nutrition et de diététique, 2010, doi : 10.1016/j.cnd.2010.10.001.

Votre vocation fait votre fierté, la nôtre est de vous assurer.



OFFRE SPÉCIALE
POUR LES MOINS DE 30 ANS

100 €
OFFERTS*

sur vos assurances
AUTO et SANTÉ
Idéal pour bien débiter !

Pour découvrir les avantages qui vous sont réservés :

- Appelez le 0 970 809 809 (numéro non surtaxé)
- Connectez-vous sur www.gmf.fr



Assurément Humain

* Offre réservée aux agents des services publics de moins de 30 ans, la première année à la souscription d'un contrat d'assurance auto et/ou d'un contrat de complémentaire santé. Offre non cumulable avec le tarif avant l'âge 30 et valable jusqu'au 31/12/2011. Conditions et détails des prestations dans votre agence GMF ou sur www.gmf.fr.

LA GARANTIE MUTUELLE DES FONCTIONNAIRES et employés de l'État et des services publics et assimilés - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances. R.C.S. Paris 775 691 140 - Siège social : 76, rue de Prony 75857 Paris Cedex 17 et ses filiales GMF Assurances, La Sauvegarde, GMF Vie, Assistance Juridique et Fidélia Assistance - Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

ASSURANCES MUTUELLES DE FRANCE - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Chartres 323 562 678 - Siège social : 7, avenue Marcel Proust 28932 Chartres Cedex 9 - Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

Les contrats complémentaires santé sont souscrits par l'A.D.A.C.C.S. auprès de GMF Assurances et la Sauvegarde.

Vivre dans un monde quantique

Vlatko Vedral

La théorie quantique ne concerne pas seulement les électrons et les atomes. Elle s'applique aussi à plus grande échelle : aux oiseaux, aux plantes, voire aux humains.

Effet quantique, effet minuscule ? Dans les manuels de physique, la théorie quantique décrit les particules, les atomes, les molécules, bref le monde microscopique, mais céderait le pas à la physique classique à l'échelle des poires, des gens ou des planètes. Il y aurait ainsi, quelque part entre la poire et la molécule, une frontière où prend fin l'étrangeté quantique et où commence le caractère familier des comportements décrits par la physique classique. L'idée que la théorie quantique se limite au monde microscopique est d'ailleurs très répandue dans le grand public. Dans son ouvrage à succès *L'Univers élégant*, Brian Greene, de l'Université Columbia, écrit par exemple que la théorie quantique « apporte le cadre théorique nécessaire pour comprendre l'Univers aux plus petites échelles ». La physique classique – c'est-à-dire toute théorie non quantique, donc les théories de la relativité aussi – décrirait l'Univers aux plus grandes échelles.

Ce cloisonnement du monde physique est un mythe. Peu de physiciens attribuent aujourd'hui à la physique classique le même statut qu'à la physique quantique. À leurs yeux, la physique clas-

sique n'est qu'une approximation utile dans un monde qui est quantique à toutes les échelles. La discrétion des phénomènes quantiques à notre échelle ne tient pas à la taille en soi des systèmes, mais à la façon dont ils interagissent. Depuis dix ans, les physiciens multiplient les expériences où se manifestent à l'échelle macroscopique des effets quantiques, dont on s'aperçoit qu'ils sont bien plus présents qu'on ne le soupçonnait. Ils pourraient même jouer un rôle dans nos cellules !

Même les spécialistes qui consacrent leur carrière à la physique quantique doivent encore assimiler ce qu'elle dit vraiment sur la nature. Les comportements quantiques échappent au sens commun : ils nous forcent à repenser notre vision de l'Univers et à en accepter une nouvelle, peu familière.

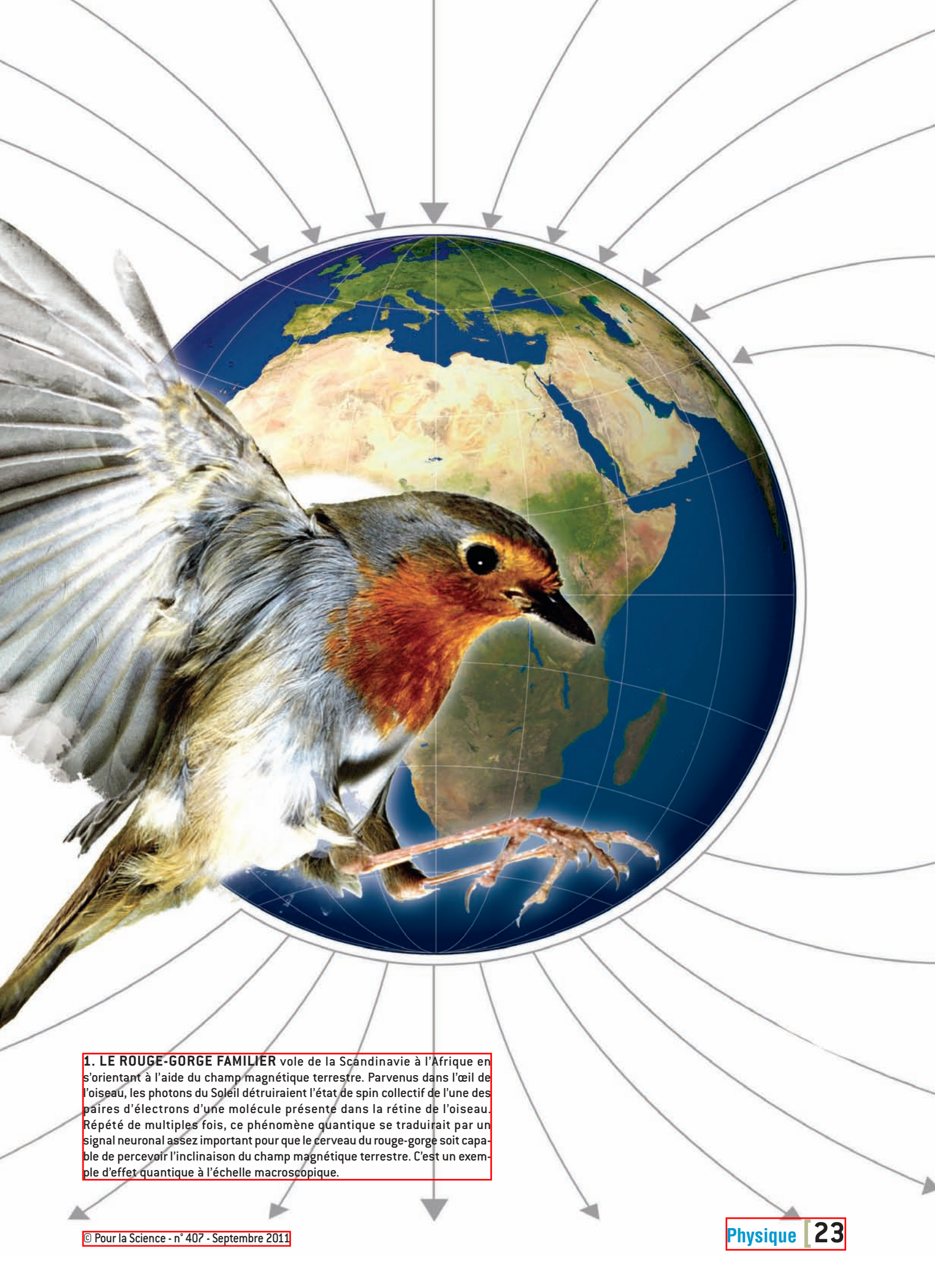
Un chat mort-vivant

Pour un expert en théorie quantique, la physique classique est la version en noir et blanc d'un monde en couleurs. Les catégories de la physique classique ne suffisent plus à saisir le monde dans sa richesse. Dans la vision propagée par les vieux manuels, la richesse des teintes se dilue à mesure qu'augmente la taille. Isolées, les

L'ESSENTIEL

- ✓ On croit souvent que la théorie quantique ne s'applique qu'aux systèmes minuscules : atomes, molécules, etc.
- ✓ Les lois quantiques s'appliquent en fait à tout et à toutes les échelles de taille, même si leurs manifestations passent parfois inaperçues.
- ✓ Les expériences des physiciens révèlent des effets quantiques dans un nombre croissant de systèmes macroscopiques.
- ✓ L'intrication est un effet quantique fondamental, qui peut être en jeu dans n'importe quels systèmes, y compris des organismes vivants.

AUSTIN VAN DENBERG



1. LE ROUGE-GORGE FAMILIER vole de la Scandinavie à l'Afrique en s'orientant à l'aide du champ magnétique terrestre. Parvenus dans l'œil de l'oiseau, les photons du Soleil détruiraient l'état de spin collectif de l'une des paires d'électrons d'une molécule présente dans la rétine de l'oiseau. Répété de multiples fois, ce phénomène quantique se traduirait par un signal neuronal assez important pour que le cerveau du rouge-gorge soit capable de percevoir l'inclinaison du champ magnétique terrestre. C'est un exemple d'effet quantique à l'échelle macroscopique.

L'AUTEUR



Vlatko VEDRAL, physicien, est professeur à l'Université d'Oxford, en Grande-Bretagne, et à l'Université nationale de Singapour.

particules seraient quantiques ; en grand nombre, elles deviendraient classiques. Cette vision est fautive, et les premières indications de ce fait remontent à l'une des plus célèbres expériences de pensée de la physique : celle du chat de Schrödinger.

En 1935, l'Autrichien Erwin Schrödinger imagina une situation macabre pour illustrer comment le monde microscopique et le monde macroscopique sont inextricablement couplés, et ne peuvent être séparés par une frontière nette. Dans son scénario, un chat est enfermé dans un local contenant un flacon de gaz mortel, un compteur de radioactivité et un atome radioactif. Si le compteur détecte de la radioactivité, un mécanisme casse le flacon, et le chat meurt.

Le compteur, appareil macroscopique, ne peut que mesurer l'un des deux états classiques possibles de l'atome : « désintégré » ou « non désintégré ». Or, dans le monde quantique, un atome peut fort bien se trouver dans un état combinant les états « désintégré » et « non désintégré » : ce que l'on nomme un état superposé. Ainsi, si l'atome radioactif est dans cet état superposé, l'existence du mécanisme brisant le flacon implique que le chat se trouve dans

un état combinant la possibilité d'être mort et celle d'être vivant, exactement comme l'état superposé de l'atome combine la possibilité qu'il soit désintégré ou non. Pour plausible que soit le dispositif de Schrödinger, il est avant tout théorique. Pour autant, il a l'intérêt de mettre en évidence, qu'en principe au moins, l'étrangeté quantique des systèmes microscopiques se communique aux systèmes macroscopiques. Et il pose une question de fond : pourquoi les gens ne voient-ils que des chats soit vivants, soit morts et pas de chats morts-vivants ?

Des états très fragiles

D'après la vision actuelle, si le monde semble si bien décrit par la physique classique, c'est parce que les interactions complexes d'un objet avec son environnement font très vite disparaître les particularités quantiques. L'information relative à l'état de santé d'un chat, par exemple, gagne rapidement son environnement sous la forme de photons et d'échanges de chaleur. Chaque phénomène quantique peut impliquer des états superposés du système en jeu (mort ou vivant), mais ces états tendent à disparaître. La fuite

Observer l'observateur

L'idée que la théorie quantique s'applique à tout dans l'Univers, y compris à nous, conduit à d'étranges conclusions. Prenons par exemple une variante de l'expérience de pensée du chat de Schrödinger, proposée par Eugene Wigner en 1961 et que David Deutsch, de l'Université d'Oxford, a précisée en 1986.

Alice, physicienne, demande à son ami Bernard d'entrer dans la pièce où se trouvent le chat de Schrödinger et un dispositif qui traduit la désintégration d'un atome radioactif en poison pour le chat. Alice sait que l'atome a été préparé dans une superposition des états « désintégré » et « non désintégré », de sorte que le chat est *a priori* à la fois mort et vivant. Comme convenu, Alice glisse un papier sous la porte, où Bernard doit lui indiquer si le chat est dans un état bien défini (mort ou vivant). Bernard répond que « oui ».

Insistons sur le fait qu'Alice ne demande pas si le chat est mort

ou vivant, parce que cela impliquerait de forcer le résultat, en d'autres termes de défaire l'état intriqué du chat. Alice se contente de vérifier que son ami voit un chat soit vivant, soit mort, sans chercher à savoir duquel des deux états il s'agit précisément.

Alice n'ayant pas défait l'état intriqué du chat, la communication avec Bernard est, en théorie quantique, une action réversible. En l'annulant, Alice annule aussi chacune des étapes franchies, de sorte que s'il était mort, le chat redevient vivant, le poison retrouve sa place et s'il était désintégré, l'atome cesse de l'être, tandis que Bernard ne se souvient plus d'avoir observé un chat soit mort, soit vivant.

Pour autant, Alice ne peut annuler l'existence du morceau de papier. Alice peut annuler l'observation, mais seulement d'une façon qui n'annule pas l'inscription se trouvant sur le papier. Ainsi, le papier

garde la preuve que Bernard a bien observé l'état du chat.

Cela conduit à une conclusion étonnante : Alice a réussi à inverser l'observation parce qu'elle a évité l'effondrement de l'état intriqué. Pour elle, Bernard est dans un état tout aussi intriqué que le chat, tandis que pour Bernard, l'état intriqué du chat s'est défait, de sorte qu'il voit un chat soit mort, soit vivant, ce dont le papier atteste... Ainsi, l'expérience met en contradiction deux observations d'un même fait : pour Alice, le chat reste mort-vivant, alors que pour Bernard, il est soit mort, soit vivant.

Créer la même situation avec un observateur humain n'est guère réaliste, mais les physiciens peuvent tenter quelque chose d'équivalent avec un système plus simple. Anton Zeilinger et ses collègues, de l'Université de Vienne, l'ont fait en faisant rebondir un photon sur un grand miroir. Si le photon est réfléchi, le mi-

roir subit un recul, mais si le photon est transmis, le miroir reste immobile. Dans un état intriqué transmis-réfléchi, le photon joue le rôle de l'atome radioactif ; le miroir, constitué de milliards d'atomes, joue celui du chat et de Bernard. Son recul ou pas est analogue à la vie ou à la mort du chat et à son observation par Bernard. Et tout le processus peut être inversé en faisant revenir le même photon sur le miroir.

En tentant de réaliser ce genre d'expérience de pensée, Wigner et D. Deutsch, puis A. Zeilinger suivent les pas de Schrödinger, d'Einstein et de tous les physiciens qui se sont confrontés à l'étrangeté de la théorie quantique. Tant que ces expériences sont restées irréalisables, y réfléchir semblait vain, car la théorie fonctionnait en pratique. Cela change aujourd'hui, de sorte qu'il devient urgent d'essayer de comprendre enfin vraiment la physique quantique.

permanente d'information vers l'environnement est le mécanisme essentiel par lequel les états quantiques de superposition se détruisent, processus nommé décohérence.

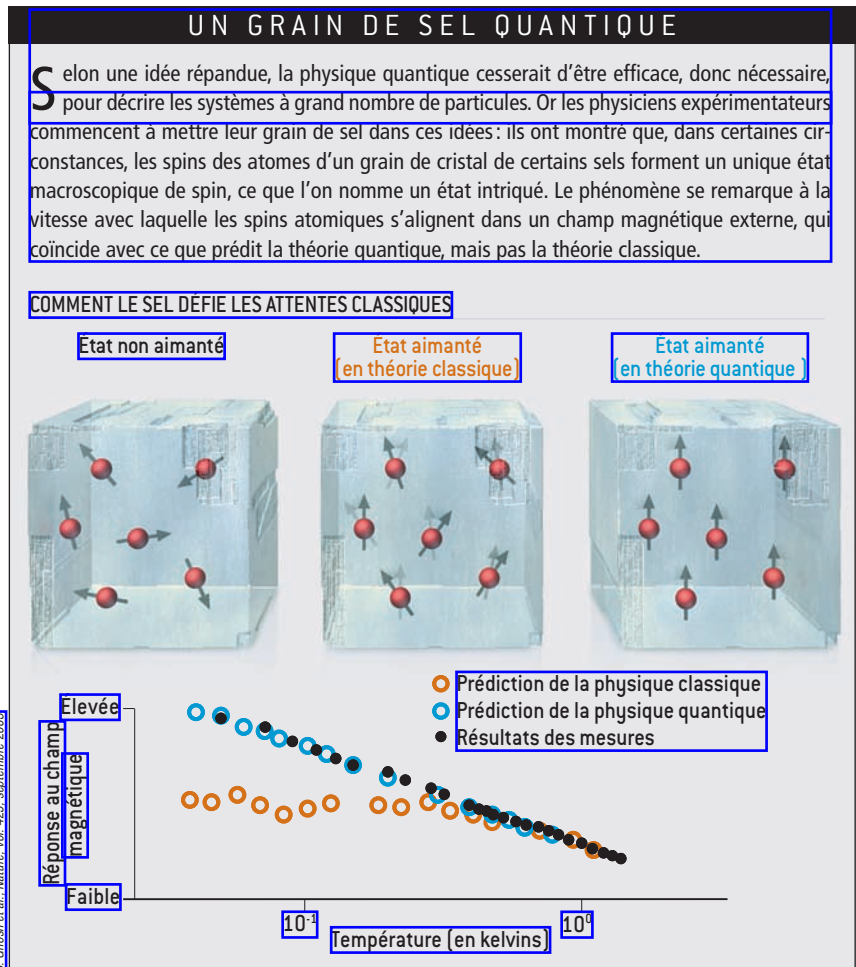
Les gros systèmes sont davantage sujets à la décohérence que les petits, tout simplement parce qu'ils laissent échapper plus d'informations. C'est pourquoi les physiciens tendent à associer la théorie quantique au monde microscopique. Dans de nombreux cas, toutefois, la perte d'information par un gros système peut être ralentie ou stoppée, ce qui met alors en évidence l'omniprésence des phénomènes quantiques.

Un phénomène quantique par excellence est l'intrication, qui transforme un ensemble de particules isolées en un tout indivisible. Son nom fut introduit en 1935 par Schrödinger dans le même article que celui où il discutait de son chat. En physique classique, les propriétés d'un système de particules peuvent toujours se ramener aux propriétés individuelles de ses composants. Ce n'est pas le cas avec un système quantique intriqué. Ainsi, un système constitué de deux particules intriquées a un comportement étonnant : même très éloignées, les particules qui le composent continuent à se comporter comme deux parties d'une entité indivisible ; c'est ce qui a conduit Einstein à parler d'« action fantomatique à distance ».

Spins intriqués

D'ordinaire, les physiciens parlent de l'intrication de paires de particules élémentaires, tels les électrons. L'une des propriétés des électrons est leur moment cinétique (ou angulaire) intrinsèque, dénommé spin (mot anglais qui signifie tourner). En simplifiant, on peut se représenter les électrons comme de minuscules toupies qui tournent soit dans le sens des aiguilles d'une montre, soit dans le sens inverse, autour d'un axe susceptible de pointer dans n'importe quelle direction : horizontalement, verticalement, à 45 degrés, etc. Pour mesurer le spin d'un électron, il faut d'abord choisir une direction, puis déterminer le sens du spin par rapport à l'axe choisi.

Supposons que deux électrons se comportent comme le prescrit la physique classique. Faisons alors en sorte que l'un des électrons tourne dans le sens horaire autour d'un axe horizontal, et l'autre tourne dans le sens inverse autour du même axe ; de cette façon, le spin total, c'est-à-dire la somme des



spins des deux électrons, est nul. Les axes de rotation des électrons restant fixes dans l'espace, le résultat d'une mesure va dépendre de l'angle entre la direction de mesure et l'axe de rotation des électrons. Si l'on mesure les deux spins selon un axe horizontal, on verra qu'ils tournent dans des directions opposées ; en revanche, une mesure dans la direction verticale ne détectera de rotation pour aucune des particules.

Pour des électrons réels, donc quantiques, les choses sont très différentes. Tout d'abord, il est possible de préparer le système des deux électrons dans un état de spin total nul, même sans avoir spécifié l'état individuel de chacune des particules. Quand on mesure le spin d'un des électrons, on trouve, au hasard, soit que l'électron tourne dans le sens horaire, soit qu'il tourne dans le sens inverse. C'est comme si l'électron décidait par lui-même dans quel sens tourner. Néanmoins, quelle que soit la direction de mesure choisie (la même pour les deux électrons), on constate que les deux spins mesurés sont toujours opposés. Tout se passe comme si une mesure d'un des spins, opé-

rée le long d'un axe, obligeait l'autre spin à prendre la valeur opposée. Comment les deux spins se « concertent-ils » ? Cela reste mystérieux. En outre, la mesure du spin de l'une des particules dans la direction horizontale n'empêche plus d'obtenir aussi un résultat dans la direction verticale, ce qui suggère que les particules n'ont pas d'axes de rotation déterminés. En un mot, les résultats des mesures effectuées sur les deux électrons sont corrélés d'une façon que la physique classique n'explique pas.

La plupart des mises en évidence expérimentales de l'intrication n'impliquent que quelques particules. Un système composé de nombreuses particules est en effet difficile à isoler de l'environnement. Ses constituants ont une probabilité bien plus grande de s'intriquer avec des particules non contrôlées de l'environnement, ce qui détruit leurs interconnexions originelles. Autrement dit, dans les termes servant à décrire la décohérence, trop d'informations s'échappent du système dans l'environnement, ce qui confère au système un comportement classique, non quantique. On comprend donc

que pour tous ceux qui cherchent à exploiter l'intrication, par exemple pour construire des ordinateurs quantiques, le principal défi est la difficulté de préserver l'intrication.

En 2003, une expérience a prouvé que des systèmes de plus grande taille peuvent rester intriqués quand on peut limiter ou contrecarrer la fuite d'information. Gabriel Aeppli, de l'*University College* de Londres, et ses collègues ont placé un morceau de fluorure de lithium dans un champ magnétique. Dans ce champ, les spins des atomes de ce sel se comportent comme de petites aiguilles aimantées susceptibles de pivoter pour s'aligner le long des lignes de champ, une réaction nommée susceptibilité magnétique. En outre, les interactions des atomes produisent une sorte de pression collective qui pousse chacun des spins à s'aligner plus rapidement. En faisant varier l'intensité du champ magnétique, les expérimentateurs ont mesuré à quelle vitesse les atomes s'alignent. Ils ont constaté que les spins s'alignent bien plus vite que ne le laissait prévoir l'intensité de leurs interactions mutuelles. Selon les auteurs de la recherche, la seule explication possible est qu'un état intriqué macroscopique s'est formé à partir des états individuels de spins des quelque 10^{20} atomes formant le morceau de sel...

Afin d'éviter les effets décohérents de l'agitation thermique, l'équipe de G. Aeppli a réalisé ses expériences à très basse température – quelques millikelvins

IL MIGRE CHAQUE ANNÉE JUSQU'EN AFRIQUE ÉQUATORIALE, puis revient au printemps, un périple de 13 000 kilomètres qu'il effectue sans se perdre. Le rouge-gorge aurait une sorte de boussole interne et... quantique.

seulement. Depuis, Alexandre Martins de Souza, du Centre brésilien de recherche en physique de Rio de Janeiro, et ses collègues ont mis en évidence au sein de matériaux tels que le carboxylate de cuivre la possibilité d'obtenir une intrication macroscopique à température ambiante, voire supérieure. Dans les systèmes qu'ils étudient, l'interaction entre spins est assez forte pour contrecarrer l'agitation thermique. Dans d'autres cas, il est possible d'obtenir une intrication macroscopique au moyen d'une force extérieure qui annule les effets de l'agitation thermique. Les physiciens ont ainsi créé de l'intrication au sein de systèmes toujours plus grands et

EXPÉRIENCES D'INTRICATION : ÇA CHAUFFE

Les effets quantiques ne se limitent pas aux particules subatomiques. Ils apparaissent également dans des expériences sur des systèmes plus grands et plus chauds. Ci-dessous, quelques exemples sont proposés.

Observation d'une figure d'interférences entre fullerènes, montrant pour la première fois que les molécules, comme les particules subatomiques, se comportent comme des ondes.

Observation d'une susceptibilité magnétique très élevée au sein de carboxylates métalliques à une température de 290 kelvins, qui ne peut s'expliquer que par l'intrication de milliards d'atomes de ces sels.

Observation d'effets quantiques qui augmentent l'efficacité de la photosynthèse dans deux espèces d'algues marines.

Observation d'effets quantiques au sein de molécules géantes, dont une en forme de pieuvre contenant 430 atomes.

Intrication de trois bits quantiques au sein d'un circuit supraconducteur. La procédure utilisée pourrait servir à obtenir des systèmes quantiques de toute taille.

Mise en vibration d'une microplaque de 40 micromètres de long (presque visible à l'œil nu) à deux fréquences en même temps.

Intrication de chaînes de huit ions de calcium maintenus dans un piège à ions. Aujourd'hui, les chercheurs sont capables de le faire sur des chaînes de 14 ions de calcium.

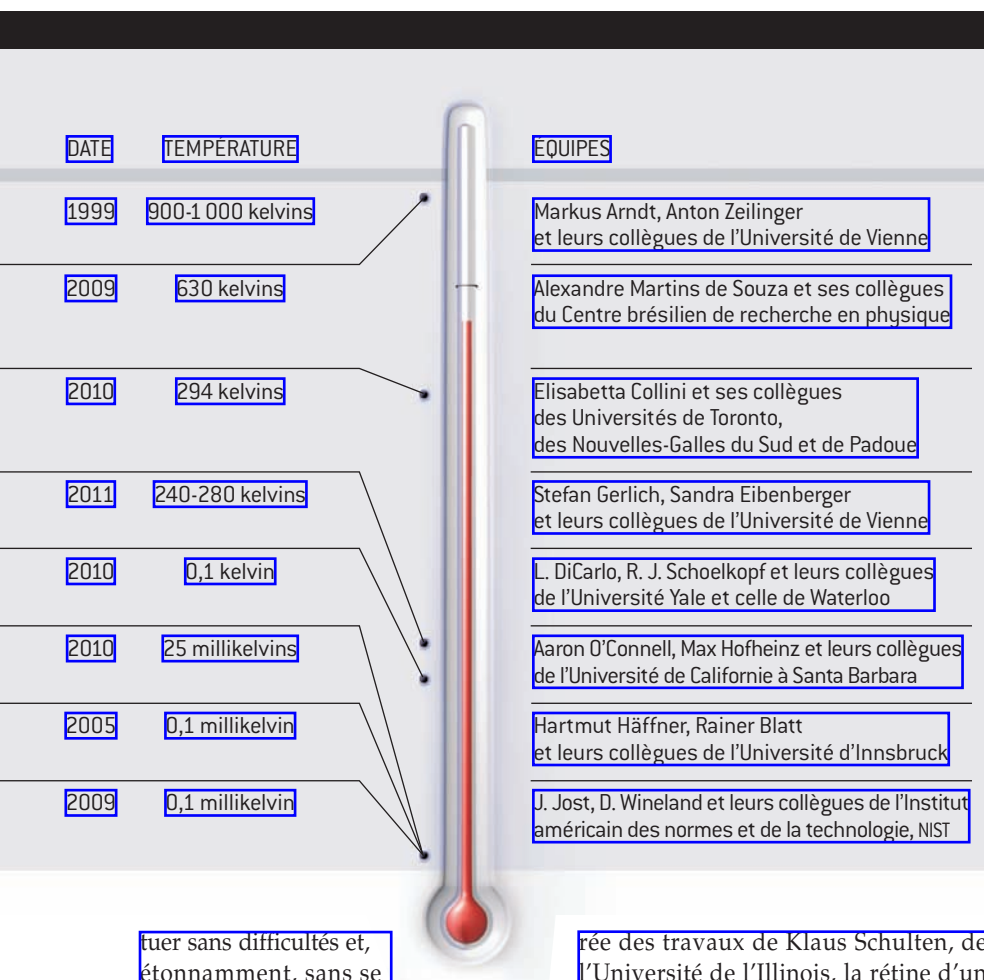
Intrication des mouvements vibratoires (plutôt que du spin ou d'autres propriétés internes) d'ions de béryllium et de magnésium.

à des températures de plus en plus élevées; cela va d'ions piégés par des champs électromagnétiques jusqu'à des atomes ultrafroids disposés en réseau, en passant par des bits quantiques supraconducteurs (voir l'encadré ci-dessus).

l'atome. Par exemple, on peut faire en sorte que si l'électron est proche du noyau, l'atome se déplace à gauche, et que si l'électron est plus loin du noyau, l'atome se déplace à droite. Ainsi, l'état électronique se trouve intriqué avec l'état de mouvement de l'atome, de la même façon que la désintégration radioactive est intriquée avec l'état du chat. On peut ainsi avoir un état intriqué avec des superpositions, où le félin à la fois vivant et mort est remplacé par un atome se déplaçant à la fois vers la gauche et vers la droite.

D'autres expériences transposent à plus grande échelle cette idée de base, de façon qu'un immense nombre d'atomes se retrouvent dans un état intriqué, impossible en physique classique. Or, si l'on peut conférer un état intriqué à des solides même lorsqu'ils sont grands et chauds, il n'y a qu'un pas à faire pour se demander si l'intrication pourrait aussi être présente dans les êtres vivants.

Un tel « organisme quantique » pourrait être *Erithacus rubecula*, un étonnant petit oiseau, qui migre chaque année entre la Scandinavie et l'Afrique équatoriale. Ce périple de 13 000 kilomètres, le rouge-gorge familier (son nom français) semble l'effec-



tuer sans difficultés et, étonnamment, sans se perdre. Comment fait-il ?

Le rouge-gorge a-t-il une sorte de boussole intérieure ? Dans les années 1970, les époux Wolfgang et Roswitha Wiltshko, de l'Université de Francfort en Allemagne, ont capturé des rouges-gorges ayant migré en Afrique et les ont placés dans un champ magnétique artificiel. Ils ont constaté que les rouges-gorges ne perçoivent pas les inversions de la direction du champ magnétique – ils ne distinguent pas le Nord du Sud –, mais qu'ils sont sensibles à l'inclinaison du champ magnétique terrestre, c'est-à-dire à l'angle que font les lignes de champ avec la surface terrestre. C'est, en fait, tout ce dont ils ont besoin pour s'orienter. Or, détail intéressant, les rouges-gorges dont on bande les yeux ne suivent plus le champ magnétique. Cela signifie que si les rouges-gorges ont une boussole interne, elle est dans leurs yeux.

En 2000, un physicien passionné par les oiseaux migrateurs, Thorsten Ritz, alors à l'Université de Floride du Sud, propose avec ses collègues une explication : l'intrication. Selon son idée, inspi-

rée des travaux de Klaus Schulten, de l'Université de l'Illinois, la rétine d'un œil d'oiseau contiendrait une molécule où deux électrons forment une paire intriquée de spin total nul.

Une rétine quantique ?

Dans le modèle théorique de T. Ritz, quand cette molécule absorbe un photon de lumière visible, les électrons reçoivent assez d'énergie pour se séparer et devenir ainsi sensibles au champ magnétique terrestre. Si le champ magnétique est incliné, il affecte différemment les deux électrons, créant un déséquilibre qui modifie la réaction chimique subie par la molécule. Des mécanismes chimiques traduisent cette différence en impulsion nerveuse, que le cerveau de l'oiseau transforme en une image du champ magnétique terrestre. L'oiseau est ainsi doté d'un dispositif d'orientation macroscopique, qui ne relève pas de la physique classique.

Bien qu'il n'y ait que des preuves indirectes de l'existence de ce mécanisme, Christopher Rogers et Kiminori Maeda, de l'Université d'Oxford, ont étudié en laboratoire des molécules semblables à celles

considérées par T. Ritz, et montré que l'intrication de leurs électrons les rend en effet sensibles aux champs magnétiques. D'après nos calculs, ces effets quantiques persistent dans un œil d'oiseau durant 100 microsecondes environ. Dans ce contexte, c'est une durée longue : le record de maintien d'un système artificiel de spins électroniques intriqués n'est que de quelque 50 microsecondes... Nous ignorons pour le moment comment un système naturel pourrait conserver aussi longtemps des effets quantiques, mais la réponse nous indiquerait comment protéger les ordinateurs quantiques de la décohérence.

La photosynthèse – le mécanisme complexe par lequel les plantes convertissent l'énergie solaire en énergie chimique – est un autre processus biologique où l'intrication est peut-être en jeu. Dans les cellules végétales, la lumière incidente éjecte des électrons, qui s'acheminent tous vers un centre de réaction où ils déposent leur énergie et déclenchent les réactions chimiques nécessaires aux cellules des plantes. Or la physique classique n'explique pas l'efficacité presque parfaite de ce mécanisme.

Des expériences réalisées par plusieurs équipes, dont celle de Graham Fleming et Mohan Samovar, de l'Université de Californie à Berkeley, ou celle de Gregory Scholes, de l'Université de Toronto, soutiennent l'idée que le rendement élevé de la photosynthèse s'expliquerait par des propriétés quantiques.

Dans un monde quantique, une particule prend tous les chemins à la fois, chacun étant affecté d'une certaine probabilité. Les champs électromagnétiques existant au sein des cellules végétales peuvent entraîner l'annulation mutuelle de certaines de ces trajectoires et le renforcement d'autres, réduisant les chances que l'électron fasse un détour peu économique et augmentant celles qu'il soit aiguillé directement vers le centre de réaction. L'intrication des états de position (chemins) possibles ne durerait qu'une fraction de seconde et ferait intervenir des molécules ne renfermant pas plus de 100 000 atomes. Existe-t-il des exemples d'intrication plus vaste et plus persistante dans la nature ? Nous l'ignorons, mais la question est assez passionnante pour susciter l'émergence d'une nouvelle discipline : la biologie quantique.

Pour Schrödinger, un chat à la fois mort et vivant était une absurdité ; toute théorie faisant pareille prédiction ne pouvait



2. AU TENNIS, L'INTRICATION de plusieurs états de position serait un avantage énorme, mais qui reste irréaliste pour un système de la taille de... Roger Federer. Toutefois, Aaron O'Connell et Max Hofheinz, de l'Université de Californie à Santa Barbara, ont réussi à placer une microplaque vibrante de 40 micromètres de long (*en bas, à gauche*) en plusieurs endroits à la fois, ou plus exactement, dans un état quantique où se superposent plusieurs modes vibratoires.

BIBLIOGRAPHIE

V. Vedral, *Decoding Reality: The Universe as Quantum Information*, Oxford University Press, 2010.

A. Ourjoumtsev, *Vers le quantique macroscopique*, *Dossier Pour la Science*, « Le monde quantique », n° 68, juillet-septembre 2010.

A. O'Connell, *Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator*, *Nature*, vol. 464, pp. 697-703, 2010.

L. Amico *et al.*, *Entanglement in many-body systems*, *Reviews of Modern Physics*, vol. 80, n° 2, pp. 517-576, 2008.

S. Ghosh *et al.*, *Entangled quantum state of magnetic dipoles*, *Nature*, vol. 425, pp. 48-51, 2003.

M. Tegmark et J. A. Wheeler, *100 ans de mystères quantiques*, *Pour la Science*, n° 262, avril 2001.

qu'être déficiente. Des générations de physiciens ont partagé ce malaise, pensant que la théorie quantique cessait de s'appliquer à grande échelle. Dans les années 1980, Roger Penrose, de l'Université d'Oxford, par exemple, a suggéré que la gravité était responsable d'une transition de la physique quantique à la physique classique pour des objets de plus de 20 microgrammes. Giancarlo Ghirardi et Tomaso Weber, de l'Université de Trieste, avec Alberto Rimini, de l'Université de Pavie, étaient d'avis, eux, que les particules en grand nombre adoptent spontanément un comportement classique.

Une frontière effaçable

Mais les expériences suggèrent plutôt que la frontière entre le monde classique et le monde quantique n'est pas fondamentale, assez d'ingéniosité expérimentale suffisant à l'effacer. Peu de physiciens pensent aujourd'hui que la physique classique s'impose vraiment à quelque échelle que ce soit. Au contraire, le sentiment général est que si une théorie plus efficace remplace un jour la physique quantique, elle montrera que le monde est encore plus contraire à l'intuition que tout ce que nous avons vu jusqu'à présent.

Ainsi, le fait que la théorie quantique s'applique à toutes les échelles nous oblige à nous confronter aux questions posées par son interprétation. Nous ne pouvons

plus les réduire à des détails n'intervenant qu'aux petites échelles. Par exemple, l'espace et le temps sont en physique deux des concepts les plus fondamentaux, mais qui ne jouent qu'un rôle secondaire en physique quantique. L'intrication est le phénomène quantique essentiel. Elle lie entre eux des systèmes sans référence à l'espace ou au temps. S'il y avait véritablement une frontière à tracer entre les mondes quantique et classique, nous pourrions nous reposer sur le cadre spatio-temporel classique pour doter la théorie quantique d'un cadre similaire. Sans cette démarcation – en fait surtout parce que le monde classique n'existe pas –, nous n'avons plus besoin de ce cadre. Il nous faut plutôt chercher à expliquer l'espace et le temps comme des phénomènes émergeant d'une façon ou d'une autre d'une physique fondamentale dénuée de cadre spatio-temporel.

Cette idée pourrait nous aider ensuite à réconcilier la physique quantique avec cet autre pilier de la physique qu'est la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui décrit la gravitation en termes de géométrie de l'espace-temps. La relativité générale suppose que les objets ont des positions bien définies et ne sont jamais à plus d'un endroit à la fois, ce qui est en contradiction avec la physique quantique. De nombreux physiciens, comme Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge, pensent que la théorie de la relativité doit céder la place à une théorie plus profonde dans laquelle l'espace et le temps n'existent pas. L'espace-temps classique émergerait de l'intrication quantique par le processus de décohérence.

Une autre possibilité, plus intéressante encore, serait que la gravitation ne soit pas une force en elle-même, mais le bruit résiduel de l'action des autres forces de l'Univers engendré par le caractère flou des phénomènes quantiques. Cette idée de « gravitation induite » remonte aux années 1960 et au physicien et dissident soviétique Andreï Sakharov. Si elle devait se révéler pertinente, alors non seulement la gravitation y perdrait son statut de force fondamentale, mais aussi tous les efforts accomplis pour la « quantifier » seraient vains. Au niveau quantique, la gravitation ne pourrait même pas exister.

Les implications du fait que des objets macroscopiques soient dans les limbes quantiques sont si hallucinantes qu'elles placent les physiciens dans un état intriqué de confusion et d'émerveillement. ■

L'ESPCI ParisTech

Inventeurs d'avenirs

Transdisciplinarité physique-chimie-biologie
Comprendre va plus loin que connaître
Allier savoir et savoir-faire
Aller de la découverte à l'invention



Stellios, chargé de recherche au laboratoire de Chimie organique

L'institution

- un campus de 20 000 m² au cœur de Paris
- 17 laboratoires
- 7 Prix Nobel décernés à 6 lauréats en 1903, 1911, 1935, 1991 et 1992
- tous les directeurs successifs ont été élus à l'Académie des sciences
- 3 Chaires de mécénat et de partenariat (Saint-Gobain, Michelin, Total)
- membre fondateur de ParisTech (1991) et de Paris Sciences et Lettres (2010)

Enseignement

- 1^{re} école d'ingénieurs dans le classement de Shanghai (2008, 2009, 2010)
- 8 filières de recrutement dont le concours commun avec l'École polytechnique et les Écoles normales supérieures
- 750 heures de travaux de laboratoire pendant les 2 premières années du cursus
- 80 ingénieurs diplômés par promotion
- 35 % de femmes
- 35 % de boursiers
- 400 000 € investis sur chaque promotion à travers le système de bourses
- 60 % des diplômés font un doctorat
- 85 % des diplômés rejoignent l'industrie

Recherche

- 1 publication scientifique par jour
- 150 doctorants sur le campus
- 250 enseignants-chercheurs et chercheurs permanents
- 1 000 citations par mois dans le monde

Innovation

- 1 brevet par semaine
- 1 start-up de haute technologie créée chaque année, avec création d'emplois très qualifiés et ambition de développement mondial

Linguistique

L'ESSENTIEL

- ✓ Les hommes parlent une multitude de langues qui ne transmettent pas les informations de la même façon. Les langues participeraient à différents aspects de la cognition humaine.
- ✓ Depuis dix ans, les linguistes ont montré que des langues différentes transmettent des capacités cognitives différentes.
- ✓ Les représentations spatiales et temporelles par exemple, mais aussi le souvenir d'événements ou l'apprentissage dépendent de la langue que l'on parle.



La langue façonne la pensée

Lera Boroditsky

Les langues que nous parlons modifient notre façon de percevoir le monde et nos capacités cognitives.

J'ai rencontré une petite fille âgée de cinq ans à Pormpuraaw, une petite communauté aborigène à l'Ouest de la péninsule du Cap York, au Nord de l'Australie. Quand je lui ai demandé de m'indiquer le Nord, elle a pointé le doigt vers le Nord, sans hésiter. Et elle ne s'était pas trompée. Plus tard, dans une salle de conférences de l'Université Stanford en Californie, j'ai réitéré ma demande auprès de chercheurs distingués, lauréats de médailles et de prix scientifiques. Je leur ai demandé de fermer les yeux (pour qu'ils ne puissent pas tricher) et de pointer le doigt vers le Nord. Beaucoup ont refusé, car ils ignoraient la réponse. Ceux qui ont accepté ont pris le temps de réfléchir et ont indiqué diverses directions... J'ai répété cette expérience à Harvard et à Princeton, ainsi qu'à Moscou, Londres et Pékin. J'ai obtenu les mêmes résultats.

Parle-t-on une même langue ?

Cette expérience met en évidence des différences cognitives quand il s'agit de se repérer dans l'espace. Comment une enfant aborigène de cinq ans peut-elle réussir, alors que d'éminents scientifiques d'autres cultures ont des difficultés ? La réponse est surprenante : la langue que parlent les différents protagonistes serait en cause.

Depuis plusieurs siècles, on soupçonne que des langues différentes peuvent transmettre des capacités cognitives distinctes. Dans les années 1930, les linguistes américains Edward Sapir et Benjamin

Lee Whorf ont étudié pour la première fois comment variaient les langues et ont émis l'hypothèse que des locuteurs de langues différentes pouvaient penser différemment. Leur idée a d'abord été accueillie avec enthousiasme, mais les linguistes n'avaient aucune preuve pour la confirmer. Dans les années 1970, la plupart des scientifiques ne soutenaient plus cette hypothèse, qui fut presque abandonnée au profit de nouvelles théories soutenant que la langue et la pensée sont universelles.

Il existe aujourd'hui plusieurs preuves expérimentales que les langues façonnent la pensée. Ces résultats renseignent sur la façon dont les connaissances et les capacités cognitives se mettent en place.

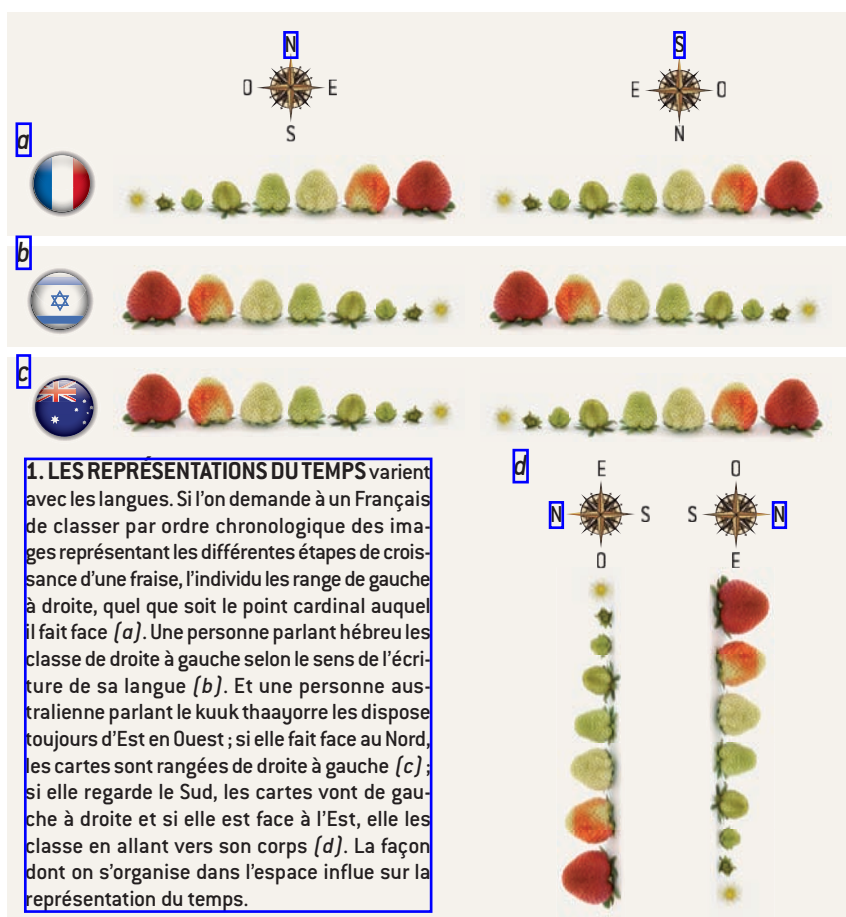
Dans le monde, les individus communiquent en utilisant environ 7 000 langues, et chaque langue requiert des caractéristiques différentes de ses locuteurs. Par exemple, supposons que je veuille dire : « J'ai vu *Oncle Vania* (la pièce de Tchekhov) dans la 42^e rue. » En mian, une langue parlée en Papouasie-Nouvelle-Guinée, le verbe employé indique si cet événement s'est produit aujourd'hui, hier ou dans un passé lointain, alors qu'en indonésien, le verbe ne précise même pas si l'événement a eu lieu ou s'il est à venir. En russe, le verbe révèle mon genre (masculin ou féminin). En mandarin (parlé par plus de 70 pour cent des Chinois), je dois préciser si l'oncle en question est paternel ou maternel et s'il est lié par le sang ou par alliance, car des mots différents existent pour tous ces types d'oncles (il s'avère que c'est un frère de la mère, comme la traduction chi-

noise l'établit). Et en pirahã, une langue parlée en Amazonie, je ne peux pas dire 42^e, car il n'existe pas de mots pour les nombres, mais seulement des mots pour exprimer des quantités (« un peu » et « beaucoup »).

Les langues diffèrent de multiples façons, mais le fait que les individus parlent différemment ne signifie pas forcément qu'ils pensent différemment. Des personnes parlant mian, russe, indonésien, mandarin ou pirahã prêtent-elles attention à des faits différents, se souviennent-elles d'événements distincts ou raisonnent-elles différemment selon la langue qu'elles parlent ? Comment le prouver ? Mon équipe ainsi que d'autres groupes de recherche ont montré que la langue façonne certaines caractéristiques fondamentales de l'expérience humaine : les nombres, l'espace, le temps, la mémoire et les relations avec autrui.

Se représenter l'espace et le temps

Retournons à Pormpuraaw. Contrairement au français et à l'anglais, la langue parlée à Pormpuraaw, le kuuk thaayorre, n'a pas de mots pour dire *gauche* ou *droite*. Les locuteurs en kuuk thaayorre parlent avec les directions cardinales (Nord, Sud, Est, Ouest, etc.). En français et en anglais, ces termes existent aussi, mais on les utilise seulement pour de grandes échelles spatiales. Par exemple, on ne dirait jamais : « Ils ont placé les couverts à poissons au Sud-Est des couverts à viande. » Mais dans la langue kuuk thaayorre, il n'y a que les



1. LES REPRÉSENTATIONS DU TEMPS varient avec les langues. Si l'on demande à un Français de classer par ordre chronologique des images représentant les différentes étapes de croissance d'une fraise, l'individu les range de gauche à droite, quel que soit le point cardinal auquel il fait face (a). Une personne parlant hébreu les classe de droite à gauche selon le sens de l'écriture de sa langue (b). Et une personne australienne parlant le kuuk thaayorre les dispose toujours d'Est en Ouest ; si elle fait face au Nord, les cartes sont rangées de droite à gauche (c) ; si elle regarde le Sud, les cartes vont de gauche à droite et si elle est face à l'Est, elle les classe en allant vers son corps (d). La façon dont on s'organise dans l'espace influe sur la représentation du temps.

Dans le monde, différentes représentations du temps existent. Par exemple, les locuteurs anglais et français considèrent que le futur est devant et le passé derrière. En 2010, Lynden Miles, de l'Université d'Aberdeen en Écosse, et ses collègues ont découvert que les locuteurs anglophones déplacent inconsciemment leur corps vers l'avant lorsqu'ils pensent au futur et vers l'arrière lorsqu'ils pensent au passé. Mais en aymara, une langue parlée dans les Andes, on dit que le passé est devant et le futur derrière. Et le langage du corps des locuteurs aymara correspond à leur façon de parler : en 2006, Raphael Nunez, de l'Université de Californie à San Diego, et Eve Sweetser, de l'Université de Californie à Berkeley, ont montré que les locuteurs aymara font des gestes devant eux quand ils parlent du passé et derrière eux quand ils discutent du futur.

Qui a fait quoi ?

La description des événements, et donc la façon dont on s'en souvient, diffèrent aussi selon les langues. Chaque événement, même un accident qui se joue en un dixième de seconde, est complexe et exige que l'on interprète ce qui s'est passé. Prenons par exemple une affaire qui a été très médiatisée aux États-Unis : l'accident de chasse à la caille de l'ancien vice-président Dick Cheney, qui a blessé son ami Harry Whittington, un avocat texan. On pourrait dire : « Cheney a blessé Whittington » (Cheney est la cause) ou « Whittington a été blessé par Cheney » (on met une certaine distance entre Cheney et le résultat) ou encore « Whittington a été criblé de petits plombs » (ce qui place Cheney en dehors de l'événement).

Dick Cheney a dit : « Finalement, je suis celui qui a appuyé sur la détente qui a tiré la cartouche qui a touché Harry », interposant ainsi plusieurs événements entre lui et le résultat. La déclaration du président George W. Bush – « Il a entendu un envol d'oiseau, il s'est tourné, a appuyé sur la détente, et il a vu son ami blessé » – disculpait davantage Cheney, le faisant passer de cause de l'accident à simple témoin !

Ce type de pirouette linguistique impressionne peu le public américain, car les formes grammaticales indirectes sont évasives en anglais. Les anglophones s'expriment plutôt de façon directe, « quelqu'un a fait quelque chose », préfé-

directions cardinales quelle que soit l'échelle spatiale : « La tasse est au Sud-Est de l'assiette » ou « Le garçon qui se trouve au Sud de Marie est mon frère. » À Pormpuraaw, on reste toujours orienté, car c'est nécessaire pour parler correctement.

Depuis 20 ans, Stephen Levinson, de l'Institut Max Planck de psycholinguistique à Nijmegen aux Pays-Bas, et John Haviland, de l'Université de Californie à San Diego, ont montré que les individus parlant des langues qui reposent sur les directions cardinales savent bien où ils se trouvent, même dans un lieu ou un bâtiment inconnu. Et ils le font mieux que les personnes ne parlant pas ce type de langues. Les exigences de leur langue renforcent la capacité à s'orienter dans l'espace.

En outre, des individus pensant différemment dans l'espace ont des chances de penser différemment dans le temps. Alice Gaby, de l'Université de Californie à Berkeley, et moi-même avons présenté à des personnes parlant le kuuk thaayorre des photographies qui montraient des progressions temporelles – par exemple un homme vieillissant, un crocodile grandissant ou une banane en train

d'être mangée. Puis, après avoir mélangé les photographies, nous leur avons demandé de les ranger sur le sol par ordre chronologique croissant (voir la figure 1).

Nous avons testé chaque personne deux fois, quand elle faisait face à des points cardinaux différents. Des individus parlant anglais (ou français) arrangent les photos de sorte que le temps s'écoule de gauche à droite. Des personnes parlant hébreu disposent les cartes de droite à gauche. En effet, le sens de l'écriture dans une langue influe sur la façon dont on organise le temps. Cependant, les personnes parlant le kuuk thaayorre ne posent pas toujours les cartes de gauche à droite ou inversement. En fait, elles les placent systématiquement d'Est en Ouest. En d'autres termes, quand elles sont assises face au Sud, les cartes vont de gauche à droite ; quand elles font face au Nord, elles disposent les cartes de droite à gauche ; quand elles sont face à l'Est, les cartes vont vers leur corps, etc. Or nous n'avons jamais dit à quiconque face à quelle direction il faisait face : les locuteurs de kuuk thaayorre le savent et utilisent spontanément cette organisation spatiale pour se représenter dans le temps.

rant des constructions transitives, telles que « John a cassé le vase », même pour des accidents. En revanche, des individus parlant le japonais ou l'espagnol ont tendance à ne pas mentionner l'agent responsable quand ils décrivent un événement accidentel. En espagnol, on dirait « Se rompió el florero », c'est-à-dire « le vase s'est cassé », voire « le vase a cassé ».

Avec mon étudiante Caitlin Fausey, nous avons découvert que ces différences linguistiques influent sur la façon dont les individus interprètent ce qui s'est passé et ont des conséquences sur les souvenirs. En 2010, nous avons demandé à des personnes parlant anglais, espagnol et japonais de regarder des vidéos qui montraient deux individus crevant des ballons, cassant des œufs et renversant des boissons, soit volontairement, soit accidentellement. Puis nous leur avons fait passer un test de mémoire à l'improviste. Pour chaque événement, les participants devaient dire quel individu avait agi. Un autre groupe de locuteurs anglais, espagnols et japonais devaient décrire les mêmes événements au moment où ils les voyaient (voir la figure 2).

En examinant les résultats, nous avons trouvé des différences de mémoire visuelle que les diverses structures linguistiques prédisaient. Les locuteurs des trois langues décrivent les événements volontaires en mentionnant l'agent responsable : « Il a crevé le ballon. » Et ils se souviennent

bien de la personne qui a agi. En revanche, pour les événements accidentels, des différences apparaissent. Les locuteurs espagnols et japonais ont tendance à ne pas décrire les accidents de façon causale, à l'inverse des locuteurs anglophones. En conséquence, les Espagnols et les Japonais se souviennent moins bien du responsable de l'acte que les anglophones. Mais ce n'est pas parce qu'ils ont une mauvaise mémoire, car ils se rappellent aussi bien que les anglophones les responsables des événements causés par un agent.

Un apprentissage différent

Non seulement les langues influent sur les souvenirs, mais les structures linguistiques pourraient aussi faciliter ou entraver l'apprentissage de faits ou de concepts nouveaux. Par exemple, dans certaines langues, tel le mandarin, les mots désignant les nombres révèlent la structure en base dix de façon plus explicite que les mots utilisés en anglais – *eleven* (11) ou *thirteen* (13) par exemple. Les enfants apprenant le mandarin comprennent donc plus tôt le système en base dix que les anglophones. Et selon le nombre de syllabes que comportent les mots désignant des nombres, il est plus ou moins facile de mémoriser un numéro de téléphone ou de faire du calcul mental. Preuve que la langue influe sur les capacités de calcul.

L'AUTEUR



Lera BORODITSKY est professeur de psychologie cognitive à l'Université Stanford, en Californie.

BIBLIOGRAPHIE

L. Boroditsky et A. Gaby, *Remembrances of times east : absolute spatial representations of time in an Australian aboriginal community*, *Psychological Science*, vol. 21, pp. 1635-1639, novembre 2010.

C. M. Fausey et al., *Constructing agency : the role of language*, *Frontiers in Cultural Psychology*, vol. 1, pp. 1-11, octobre 2010.

S. Danziger et R. Ward, *Language changes implicit associations between ethnic groups and evaluation in bilinguals*, *Psychological Science*, vol. 21, pp. 799-800, juin 2010.

Des connaissances prélinguistiques universelles

L'extrême diversité des langues dans le monde serait liée à des différences de cognition, et chaque langue serait associée à une « façon de penser ». Cette idée doit cependant être nuancée. Les variations cognitives observées selon la langue semblent toujours concerner les mêmes domaines, à savoir le nombre, l'espace et le temps d'une part, la mémoire et les relations avec autrui d'autre part. Il est remarquable que ces domaines correspondent à ce que plusieurs scientifiques nomment les connaissances noyaux. Il s'agit de connaissances prélinguistiques, c'est-à-dire qu'elles se développent tôt chez l'enfant, avant même l'apparition du langage. De fait, on peut les mettre en évidence avec des tâches spécifiques que l'on teste chez le jeune

enfant sans utiliser la langue. Mais les différences cognitives observées dépendent-elles de la langue ou des connaissances noyaux ? Comment expliquer que ces variations concernent toujours les mêmes domaines, du nombre, du temps ou de l'espace, si elles ne sont pas innées (et donc propres à l'espèce humaine) ?

La plupart des linguistes admettent aujourd'hui que certaines capacités langagières sont innées chez l'homme, et la nature de cette prédisposition est l'enjeu de nombreux travaux. Tous les hommes ont une langue quels que soient leur culture et leur pays d'origine. Des enfants naissant dans un environnement linguistique appauvri reconstruisent spontanément la complexité naturelle des langues. On a par exemple montré au Nicara-

gua, dans les années 1980-1990, que des jeunes sourds sont capables de créer une langue des signes pour communiquer. Certains linguistes pensent que cette prédisposition est spécifique à l'espèce humaine et au langage, et contiendrait tous les aspects de la grammaire, communs à toutes les langues du monde. C'est la « grammaire universelle » étudiée par le linguiste et philosophe américain Noam Chomsky depuis les années 1950.

Des linguistes suggèrent donc que les variations observées au niveau de la pensée ne sont de fait pas des différences linguistiques au sens strict, mais qu'elles sont liées à des variations propres aux connaissances prélinguistiques. Elles pourraient être des différences d'« usage », de pratique, d'environnement ou d'éducation ; elles

dépendent souvent d'un individu ou d'un groupe social. Par exemple, si l'on enseigne une seconde langue à son enfant, il ne faut pas imaginer que, selon la langue choisie, il aura moins de préjugés ou que son jugement dépendra de la langue qu'il parle, la maternelle ou la seconde. S'il est aujourd'hui important de s'interroger sur la nature et la portée de ces différences cognitives, je pense qu'elles ne sont pas des variations linguistiques à proprement parler : elles sont plutôt des variations sociales ou individuelles que le système de la langue rend visible. Et ce simple fait doit nous amener à réfléchir.

Pierre Pica,

CNRS, Laboratoire Structures formelles du langage, Université Vincennes-Saint-Denis, Paris 8



2. L'INTERPRÉTATION D'UN ÉVÉNEMENT dépend de la langue. Une personne japonaise décrit un événement accidentel de façon indirecte : « Le vase a été renversé » (a). Un Anglais en parle toujours de façon transitive : « Pierre a cassé le vase » (b). Ainsi, si l'Anglais se souvient toujours du responsable, le Japonais a tendance à l'oublier, peut-être parce qu'il ne le mentionne pas dans sa langue.

Qui plus est, selon leur langue maternelle, les enfants prennent conscience de leur genre, masculin ou féminin, à des stades de développement différents. En 1983, Alexander Guiora, de l'Université du Michigan à Ann Arbor, a comparé trois groupes d'enfants dont la langue maternelle était l'hébreu, l'anglais ou le finnois. L'hébreu souligne souvent le genre, car même le mot *tu* en a un (il diffère selon qu'il se réfère à un individu de sexe masculin ou féminin). Le finnois n'a pas de mot spécifique au genre (les pronoms *il* et *elle* n'existent pas) et l'anglais est intermédiaire. En conséquence, les enfants grandissant dans un environnement où l'on parle l'hébreu ont conscience de leur genre environ un an avant les petits Finlandais ; et les anglophones se situent entre les deux.

Voilà donc quelques résultats montrant que les différentes langues influent sur la cognition. Mais ces différences linguistiques créent-elles des différences de pensée, ou est-ce l'inverse ? Les deux sont vrais. Depuis environ dix ans, comme nous venons de le voir, plusieurs expériences ont établi que la langue que l'on parle change la façon de penser. Autres exemples : apprendre à des individus de nouveaux mots désignant des couleurs modifie leur capacité à distinguer les couleurs. Et enseigner à des personnes une

nouvelle façon de parler du temps leur confère une nouvelle conception du temps.

Par ailleurs, on peut aborder la question autrement, en travaillant avec des personnes bilingues. On a montré que les bilingues ne conçoivent pas le monde de la même façon selon la langue qu'ils emploient. En 2010, Oludamini Ogunnaike et ses collègues, de l'Université Harvard, et Shai Danziger et ses collègues, de l'Université Ben Gourion du Neguev en Israël, ont montré, indépendamment, qu'un bilingue n'apprécie pas les mêmes personnes selon la langue dans laquelle il est interrogé. Les chercheurs ont étudié les réactions de bilingues arabe-français au Maroc, de bilingues espagnol-anglais aux États-Unis et de bilingues arabe-hébreu en Israël. Ils ont testé les préjugés implicites des participants.

Qui de la langue ou de la pensée est arrivée en premier ?

Par exemple, ils ont demandé aux bilingues arabe-hébreu d'appuyer rapidement sur un bouton en réaction à des mots, sous diverses conditions. Dans un cas, si les sujets voyaient un nom juif comme *Yaïr* ou un trait de caractère positif tel *bon* ou *fort*, ils devaient appuyer sur la touche M ; s'ils voyaient un nom arabe comme *Ahmed* ou un trait de

caractère négatif comme *moyen* ou *faible*, ils appuyaient sur la touche X. Dans un autre cas, cette association était inversée : les noms juifs et les traits de caractères négatifs partageaient la même touche X, et les noms arabes et les traits de caractères positifs correspondaient à la touche M.

Les chercheurs ont mesuré la rapidité de réaction des participants dans chaque situation. En psychologie cognitive, on utilise cette tâche pour évaluer les préjugés involontaires ou automatiques, par exemple les traits de caractères positifs et les groupes ethniques souvent associés dans l'esprit des gens. Ainsi, les scientifiques ont montré que les préjugés dépendent de la langue dans laquelle ils interrogent les sujets. Par exemple, les bilingues arabe-hébreu ont des attitudes implicites plus positives envers les juifs quand ils sont testés en hébreu que lorsqu'ils sont interrogés en arabe.

En conséquence, la langue participe à différents aspects de la cognition. Le comportement des individus dépend de la langue qu'ils parlent, même quand ils réalisent une tâche simple, par exemple distinguer des couleurs, compter des points sur un écran ou s'orienter dans une pièce. En outre, nous avons montré que limiter la capacité d'un individu à accéder à ses facultés linguistiques – par exemple en lui donnant une tâche verbale contraignante à réaliser en même temps, tel dicter un article de journal – diminue ses capacités à accomplir ces tâches simples. En fait, la pensée serait un ensemble de mécanismes linguistiques et non linguistiques. Les domaines de la cognition humaine où la langue ne joue aucun rôle doivent sans doute être rares.

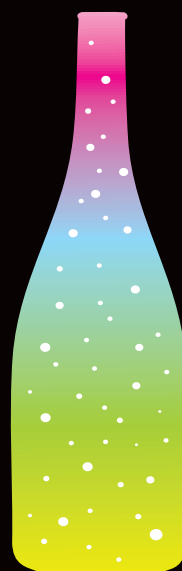
Une caractéristique importante de l'intelligence humaine est son « adaptabilité », c'est-à-dire sa capacité à inventer et à réarranger des concepts selon l'environnement. La grande diversité des langues dans le monde est une conséquence de cette adaptabilité. Chaque langue apporte sa « trousse à outils » cognitive et renferme la connaissance et la vision du monde développées au cours de plusieurs milliers d'années dans une culture. Elle contient une façon de percevoir le monde, de l'appréhender et de lui donner une signification, et représente un guide que les ancêtres ont développé et perfectionné. Les recherches sur la façon dont les langues parlées modèlent la pensée permettent aux scientifiques de découvrir comment l'homme crée la connaissance et construit la réalité. ■

Soif de
connaissances
scientifiques ?

Tarif exclusif
étudiants
+ de 37 % de réduction !

Abonnez-vous 1 an à
■ POUR LA
SCIENCE

1 an ■ 12 numéros
47 € seulement
(au lieu de 74,70 €)



BULLETIN D'ABONNEMENT

■ POUR LA
SCIENCE

à retourner accompagné de votre règlement à : Service Abonnements • Pour la Science • 8, rue Férou • 75278 Paris Cedex 08

☐ Oui, je m'abonne et reçois **12 numéros de Pour la Science** pendant **1 an** au prix de **47 €* (au lieu de 74,70 €, prix de vente au numéro)**. Je bénéficie également de leur version numérique sur www.pourlascience.fr.

* Tarif valable uniquement en France métropolitaine et France d'Outre-Mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter au prix de l'abonnement : Europe 12 € - autres pays 25 €.

☐ Je préfère m'abonner uniquement à **la version numérique de Pour la Science** pendant **1 an** au prix de **40 € (au lieu de 62,40 €, prix de vente en ligne par numéro)**, soit 12 numéros consultables et téléchargeables sur www.pourlascience.fr.

Important : Pour bénéficier de ces offres, merci de joindre impérativement la photocopie de votre carte étudiante ou un justificatif de votre profession d'enseignant.

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. (facultatif) : _____

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

_____ @ _____

Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire

Numéro de carte

Date d'expiration

Cle
les 3 chiffres au dos de votre CB

Signature obligatoire

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

Des insectes pour guérir

Roland Lupoli

Depuis 5 000 ans, les insectes sont utilisés en médecine traditionnelle. En étudiant leurs principes actifs, des biochimistes mettent au point de nouvelles molécules thérapeutiques.

Si les Occidentaux apprécient papillons, coccinelles et abeilles, leur avis est plus contrasté à l'égard des autres insectes, qu'ils considèrent souvent comme de la vermine. Il est vrai que certains insectes sont nuisibles pour l'homme. Les femelles des moustiques *Anopheles* transmettent le paludisme et les femelles des moustiques *Aedes*, la fièvre jaune. Ces deux exemples actuels sont les plus meurtriers, mais nombre d'autres espèces d'insectes sont ou ont été responsables de transmissions de maladies humaines ou restent des fléaux pour l'agriculture.

Ce sentiment de dégoût occidental envers les insectes et, plus généralement, les arthropodes terrestres (insectes, mais aussi arachnides et myriapodes), n'est pas lié à ces effets désastreux, mais à leur simple présence dans les habitations et l'environnement. L'amélioration des conditions d'hygiène depuis la fin du XIX^e siècle, puis l'utilisation de pesticides, ont donné l'impression que l'on pourrait vivre dans un monde sans insectes. Les arthropodes sont alors devenus synonymes de saleté et de danger.

Ce dégoût s'est amplifié durant les 50 dernières années. L'entomologie, qui représentait le tiers du programme des

sciences de la vie et de la Terre en classe de cinquième dans les années 1960, n'y est plus enseignée. Les bacheliers actuels ne savent pas ce qu'est un insecte ! Les entomologistes systématiciens professionnels ne sont pas renouvelés depuis les années 1980, laissant des groupes entiers sans spécialistes. Des films et jeux télévisés regorgent de contacts avec des insectes pour simuler le comble de l'horreur.

Pourtant, les insectes présentent de nombreux intérêts pour l'homme, le premier étant la pollinisation des plantes. Environ 80 pour cent des plantes sont pollinisées par les insectes. Certes, quelques espèces sont des ravageurs des cultures, mais un quart d'entre elles sont des prédateurs et parasites d'autres insectes. D'autres consomment les excréments, évitant l'étouffement des sols, et d'autres encore contribuent à l'aération des sols.

Les insectes ont aussi été exploités par l'homme. L'industrie textile chinoise doit son essor, depuis 5 000 ans, à la fibre que sécrète le ver à soie pour fabriquer son cocon. Le miel et la cire produits par l'abeille domestique sont exploités depuis plus de 3 500 ans. Les cochenilles sont la source de



LES CORDYCEPS (CI-CONTRE SÈCHÉS), chenilles parasitées par un champignon, font partie des nombreux insectes utilisés en médecine traditionnelle chinoise. Ils sont stockés dans des récipients de ce type (ci-dessus).

L'ESSENTIEL

✓ Les mêmes insectes sont utilisés en médecine traditionnelle par différentes cultures.

✓ Ces insectes constituent des pistes prometteuses pour de nouveaux médicaments.

✓ En s'inspirant des substances actives produites par ces insectes, des biochimistes élaborent de nouvelles molécules à visée thérapeutique.

✓ La recherche systématique, chez les insectes, des molécules actives augmenterait les chances de trouver de nouveaux médicaments.

© Shutterstock, J. Hughes, Norman Chan, Polakov, Alexander

produits aussi variés que des colorants textiles et alimentaires, de la cire et de la laque. Certains insectes représentent une source locale importante de protéines, vitamines et minéraux : 1 417 espèces d'insectes appartenant à 112 familles sont consommées par 3 000 ethnies dans 36 pays d'Afrique, 29 d'Asie et 23 d'Amérique.

Nombre de peuples, enfin, les utilisent comme médicaments depuis plusieurs milliers d'années. Aujourd'hui, l'industrie pharmaceutique commence à s'intéresser au potentiel thérapeutique des insectes : leur utilisation en médecine traditionnelle est-elle seulement placebo ou s'accompagne-t-elle d'effets thérapeutiques réels ? Peut-on mettre en évidence et produire de nouvelles molécules actives à partir de ces pratiques ancestrales ? Cette stratégie est-elle envisageable à grande échelle ? Telles sont les questions que nous examinerons ici.

Des millénaires d'insectes médicinaux

Aujourd'hui, 80 pour cent de la population mondiale se soigne avec des substances naturelles, et plus de 60 pour cent des médicaments occidentaux sont des dérivés, modifiés ou inspirés, de molécules de plantes et de micro-organismes. Pourtant, ces molécules représentent moins de un pour cent des 30 millions de molécules connues. Et compte tenu du faible nombre d'espèces vivantes étudiées, il reste sans doute dix fois plus de molécules naturelles à découvrir. Le potentiel thérapeutique de la nature est donc toujours énorme. Les insectes constituant à eux seuls 59 pour cent de la biodi-

versité du vivant (voir l'encadré page 40), l'idée d'étendre la recherche de nouvelles molécules actives aux insectes vient donc assez naturellement, d'autant que l'histoire de leur utilisation curative est ancienne.

Des textes en écriture cunéiforme sur tablettes d'argile mésopotamiennes attestent d'une utilisation en médecine il y a 5 000 ans. Les pharaons égyptiens vénéraient les insectes médicinaux et on a découvert, sur des papyrus de 3 550 ans, des textes concernant l'utilisation en médecine d'insectes, de scorpions, d'araignées ou de leurs dérivés. En Chine, le plus ancien traité de médecine connu date de 4 700 ans. Au fil des siècles, la médecine traditionnelle chinoise a perpétué l'utilisation d'insectes par l'intermédiaire de divers ouvrages de référence, en particulier le *Bencao gangmu*, une encyclopédie de l'histoire de la pharmacopée naturelle rédigée par le médecin chinois Li Shizhen au XVI^e siècle. Elle est aujourd'hui pratiquée dans toute l'Asie.

En Afrique et en Amérique du Sud, les insectes font partie de la pharmacopée, mais les médecines traditionnelles disparaissent en raison de l'absence de traces écrites. En l'espace de quelques décennies, les ethnologues ont constaté la disparition de remèdes prescrits depuis des siècles.

En Occident, les Romains utilisaient aussi des traitements à base d'insectes. Le médecin grec Dioscoride (I^{er} siècle) en mentionne dans le second livre de son ouvrage *De la matière médicale*, et Galien (II^e siècle) le suit. La médecine arabe répertorie aussi de tels remèdes entre les VIII^e et XIII^e siècles, notamment sous la plume des médecins Rhazès et Avicenne. À partir du XI^e siècle, les universités de médecine se sont développées dans l'Occident chrétien.



En France, l'engouement pour les insectes médicinaux atteint son apogée au début du XVIII^e siècle. Ils furent ensuite abandonnés au XIX^e siècle, avec l'apparition de la médecine moderne en Europe.

Des insectes prescrits dans diverses cultures

Malgré cette longue histoire de la médecine traditionnelle par les insectes, l'industrie pharmaceutique occidentale ne se lance que timidement dans son exploration. Et pour cause : elle se veut rationnelle et reproductible. Avant d'être commercialisées, les molécules actives sont isolées, identifiées et testées de longues années sur l'animal, puis chez l'homme, pour vérifier leur activité et leur innocuité. Or les médecines traditionnelles utilisent des extraits bruts, mélanges de centaines de molécules non identifiées et présentes en concentration variable. Les remèdes ont parfois une connotation magique. Par diverses incantations, le praticien traditionnel ou le chaman renforcent leur éventuelle action par effet placebo.

Dans ces conditions, comment savoir si derrière une pratique médicale traditionnelle se cache une molécule active ? Certains remèdes sont moins efficaces que ceux de la médecine moderne, mais les ignorer tous est aussi irrationnel que de ne s'en remettre qu'à eux. À l'époque de leur contact avec les Européens, les Amérindiens avaient des centaines d'années d'avance sur la pratique des accouchements : ils employaient des antidouleurs et des techniques de délivrance du placenta bien avant leur utilisation en Europe. De nombreux médecins ont ainsi cru avoir inventé des traitements qui étaient déjà en usage depuis des siècles.

La prescription sur une longue période d'un remède en médecine traditionnelle est un indice d'efficacité, mais pas une preuve suffisante. En revanche, l'utilisation d'un même groupe d'insectes pour une même indication et de façon indépendante par différentes cultures sur plusieurs continents – c'est-à-dire la convergence d'indications – suggère la présence de molécules actives et une efficacité du traitement. Des convergences d'indications ont ainsi été mises en évidence dans plusieurs pays et nous en donnons quelques exemples, en rappelant que les usages mentionnés en France et en Europe ont cessé au plus tard à la fin du XIX^e siècle.

Ainsi, les blattes sont utilisées en Chine, en Thaïlande, en Grèce et au Burkina Faso comme antibiotique contre les otites, ou en Russie et dans le monde arabe comme diurétique ; les nids de guêpes sont (ou étaient) réputés pour leurs effets anticancéreux (Chine et Europe), antibiotique (Chine, Cameroun, Mali, Zambie), analgésique (Chine, France, Libéria, Mozambique) et anti-inflammatoire (Chine, Brésil) ; des fourmis ont été prescrites pour leur effet analgésique, en particulier contre l'arthrite et les rhumatismes (France, Russie, Afrique du Sud, Mexique, Brésil, Australie), ou leur effet neurotonique (Chine, France, Maroc), voire pour suturer les plaies avec leurs mandibules (Inde, Turquie, Mexique) ; les miels sont connus depuis longtemps sur tous les continents pour leur effet antibiotique et pour faciliter la cic-

trisation, et le venin d'abeille soulage l'arthrite et les rhumatismes, tant en Corée qu'en Europe, au Soudan ou au Brésil.

Les substances actives sont situées dans des glandes de défense, des glandes salivaires ou à venin, ou encore sont stockées dans le corps. La médecine traditionnelle utilise généralement les corps entiers des insectes. Ils sont ébouillantés, puis séchés avant d'être administrés en décoction dans l'eau ou sous forme de poudre dans l'alimentation. En Chine, la punaise *Pentatomoidea Aspongopus chinensis* est préparée de cette façon pour traiter les douleurs hépatiques, gastriques ou articulaires. Au Mexique, certaines punaises *Pentatomoidea* des genres *Edessa* et *Euschistus* sont écrasées vivantes ou séchées, puis cuisinées dans du riz ou des tortillas. Elles sont utilisées pour soulager les douleurs musculaires,

QUELQUES ARTHROPODES MÉDICINAUX

CORDYCEPS

Le cordyceps est une chenille de papillon *Hepialidae* du genre *Thitarodes* infectée par le champignon *Cordyceps sinensis*. L'ensemble chenille-champignon est appelé cordyceps. Il est récolté entier dans le sol, sur les hauts plateaux de l'Himalaya. Le cordyceps est utilisé depuis 1 400 ans en Chine comme remède anti-âge à large spectre. Il est réduit en poudre juste avant emploi, et 3 à 15 grammes sont pris par jour en décoction ou avec l'alimentation, à raison de 1 à 3 grammes par prise. Il tonifie les poumons, les reins, le système immunitaire, en particulier chez les personnes âgées ou affaiblies. De nombreuses publications scientifiques ont démontré des activités antioxydantes, détoxifiantes, vasodilatatrices, hypoglycémiantes et un effet immunosuppresseur, *in vitro* et *in vivo*. Son efficacité est devenue célèbre, car deux athlètes chinoises ayant battu trois records du monde avaient utilisé du cordyceps pour leur préparation. Actuellement, de nombreuses sociétés le commercialisent en le cultivant sur divers supports et un véritable trafic se développe autour du cordyceps naturel, avec des prix qui approchent 25 000 euros le kilogramme.

CANTHARIDE

Les cantharides sont des coléoptères *Meloidae*. Elles produisent de la cantharidine, une molécule toxique concentrée [un à deux pour cent de l'animal]. En Chine, le méloïde *Mylabris* (*ci-contre Mylabris variabilis*), utilisé depuis 2 000 ans, a une action anticancéreuse et une action antibiotique sur la peau. En Europe, *Lytta vesicatoria* était employé pour ses propriétés vésicatoires sur la peau et aphrodisiaques. La poudre d'insecte maintenue dans un emplâtre permettait de chauffer localement la peau et de dilater les vaisseaux proches des zones à soigner. Ce traitement a été utilisé plusieurs siècles jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Les hospices civils de Paris consommaient encore 450 kilogrammes de cantharides en 1880.

La cantharidine irrite les voies urinaires et génitales. Il s'ensuit une excitation réflexe variable selon les individus pouvant aller jusqu'à un priapisme (érection pathologique) douloureux. L'action aphrodisiaque de la cantharide est bien documentée depuis l'époque romaine, et sa réputation sulfureuse a atteint son apogée au XVIII^e siècle sous la plume du Marquis de Sade. L'activité anticancéreuse de la cantharidine, ainsi que celle de son isomère moins toxique, la norcantharidine, et de ses analogues a été montrée expérimentalement *in vitro* et *in vivo* depuis un vingtaine d'années. En 2005, Thomas Efferth, du Centre de recherche allemand sur le cancer, à Heidelberg, et ses collègues ont montré que la cantharidine endommage l'ADN de cellules tumorales et provoque leur apoptose (mort cellulaire programmée).

pulmonaires, hépatiques, gastriques, lombaires, ainsi que les maux de dents. Aussi bien en Chine qu'au Mexique, ces remèdes font partie de la pharmacopée traditionnelle depuis plus de 1 000 ans.

Certaines indications ont été confirmées expérimentalement *in vitro* ou *in vivo* dans un nombre limité de cas, mais la plupart nécessiteront des études ciblées approfondies pour identifier les molécules impliquées et comprendre comment ces molécules agissent sur l'homme. Chez la petite cigale rouge et noire *Huechys sanguinea*, par exemple, prescrite en médecine traditionnelle chinoise contre différents cancers, la Société *Entomed*, une jeune pousse créée en 1999 sous l'impulsion de l'Institut de biologie moléculaire et cellulaire du CNRS de Strasbourg, a mis en évidence des molécules cytotoxiques, les phyllantusols, actives *in vitro* contre des cel-

lules de cancer du sein en culture. Chez le scorpion *Mesobuthus martensii*, prescrit en Chine contre les convulsions, des biologistes chinois ont isolé en 2001 une neurotoxine, le peptide BmK AEP, qui présente une activité anticonvulsivante *in vivo* chez le rat.

Mais entre ces premiers indices et la commercialisation de médicaments, la route est longue et peu d'entreprises l'ont suivie jusqu'au bout. L'exemple de la Société *Entomed* est représentatif des méthodes mises en œuvre et des difficultés rencontrées. De 1999 à 2005, *Entomed* a cherché à développer des médicaments dérivés d'insectes. Jusqu'en 2002, elle a produit des peptides antimicrobiens par immunisation, en injectant un cocktail de micro-organismes – les bactéries *Micrococcus luteus*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, pathogènes pour l'homme – à des larves de

dizaines d'espèces d'insectes : il s'agissait de surexprimer les défenses naturelles des larves contre ces bactéries afin d'isoler les molécules actives correspondantes. Les peptides actifs purifiés, constitués de 40 à 50 acides aminés, étaient ensuite synthétisés par des levures que l'on avait transformées en ajoutant à leur génome les gènes codant ces peptides. Ceux-ci étaient alors testés *in vivo* sur des souris infectées.

Des recherches pharmaceutiques

Ces travaux ont permis d'identifier la structure de centaines de peptides actifs naturels et de produire des peptides modifiés plus actifs. Parmi ceux-ci, le peptide hybride antibactérien ETD-1263, de la famille des défensines, petites protéines du système immunitaire de divers vertébrés et invertébrés, inhibe les staphylocoques multirésistants, impliqués dans les maladies nosocomiales. Il a été construit en mélangeant des séquences isolées de plusieurs espèces d'insectes. Malgré l'intérêt thérapeutique de ces molécules, ce programme a été arrêté en raison du coût élevé de production de ces grands peptides.

Entomed a alors élargi son champ d'action thérapeutique aux petites molécules organiques présentant des propriétés anticancéreuses. Le choix des insectes s'est orienté vers des groupes pour lesquels la défense chimique est primordiale, telles les espèces toxiques dites aposématiques : la coloration vive de ces insectes est un signal d'alarme qui avertit les prédateurs de leur toxicité. Les coccinelles, par exemple, ont souvent des couleurs aposématiques et excrètent un liquide jaune ou orange riche en alcaloïdes toxiques dès qu'un prédateur... ou des doigts les attrapent.

Les molécules de défense sécrétées par les insectes aposématiques ont souvent un effet cytotoxique. Certaines bloquent la division cellulaire, ce qui en fait des molécules intéressantes pour les traitements anticancéreux : les cellules cancéreuses se multiplient plus vite que les cellules saines, elles sont les premières à subir les effets de telles molécules cytotoxiques.

Un réseau de collaborations a permis de réunir la plus grande banque d'insectes au monde : 1 400 lots, chacun en quantité supérieure à 10 grammes, provenant de 800 espèces différentes, ciblées pour leur toxicité. Sur un total de 1 000 extraits analysés, 125 extraits actifs ont été sélectionnés.

TOILES D'ARAIGNÉES

Les toiles d'araignées sont prescrites depuis plusieurs millénaires et sur plusieurs continents pour stopper les saignements et cicatriser les plaies. Elles étaient aussi employées pour traiter les fièvres et les convulsions. Dans les années 1930, des dispensaires aux États-Unis les utilisaient officieusement, bien que leurs médecins pensaient que l'imagination des patients était le principal remède. Aucune recherche n'a été menée sur ce qui s'apparente à un remède de sorcière. Toutefois, les araignées déposent sur leurs fils des gouttelettes de 50 micromètres riches en molécules hydrosolubles pour conserver une certaine humidité. Ces molécules, tels le gabamide, la choline ou la taurine, sont proches de neurotransmetteurs. Elles représentent 40 à 70 pour cent de la masse sèche des toiles d'araignées et pourraient expliquer leur utilisation dans le traitement des convulsions. En 2008, Jay Meythaler et ses collègues, du *Rehabilitation Institute* de Detroit, aux États-Unis, ont déposé un brevet sur l'utilisation du gabamide dans le traitement des spasmes, des convulsions et de l'épilepsie.

ASTICOTS CICATRISANTS

L'activité cicatrisante de certains asticots de mouches est connue depuis longtemps. Les Mayas et des aborigènes australiens appliquaient des asticots sur les plaies pour favoriser leur cicatrisation. En 1557, Ambroise Paré a redécouvert cette technique, qui fut employée ensuite pendant les guerres napoléoniennes. Durant la Première Guerre mondiale, le médecin américain William Baer refit cette découverte et l'appliqua à l'hôpital de façon contrôlée à son retour aux États-Unis. Dès les années 1930, cette technique, nommée *Maggot therapy*, a été utilisée en routine dans 300 hôpitaux américains, avant d'être balayée par l'arrivée des antibiotiques après la Seconde Guerre mondiale.

L'apparition de souches bactériennes résistantes aux antibiotiques dans les années 1980 fit renaître l'asticothérapie. Aujourd'hui, plusieurs sociétés commercialisent des larves stériles de la mouche *Lucilia sericata* (ci-contre) pour cicatriser les plaies. Leur efficacité est médicalement reconnue, sans que l'on en comprenne complètement le mécanisme, résultat d'un ensemble d'effets physiques et chimiques que l'on n'a pas réussi à reproduire sans asticots. Plus de 30 000 traitements sont effectués dans le monde chaque année. Bien que 500 hôpitaux la pratiquent en Europe, la larvothérapie n'est pas encore autorisée en France, mais une étude est en cours pour y parvenir.



© Shutterstock/Mormon Chan, Marek F. Sliwinski, Sinesa Bojars, Keith Ambert, iStock

BIODIVERSITÉ ET INSECTES

Représentant 59 pour cent de l'ensemble des espèces vivantes connues, les insectes sont le groupe d'organismes le plus riche. Associés aux autres arthropodes terrestres (arachnides, mille-pattes, cloportes), ils sont répartis en 58 ordres, 1 600 familles et un million d'espèces. Des estimations fondées sur des échantillonnages d'arbres en forêts tropicales ont établi que le nombre d'espèces d'insectes restant à découvrir pourrait être cinq à dix fois supérieur au nombre d'espèces connues. Au rythme actuel de découverte des espèces d'insectes (environ 7 000 par an), il faudra au minimum 500 ans pour toutes les répertorier – si elles ne se sont pas éteintes d'ici là...

Insectes posés sur le drap d'un piège lumineux.



puis fractionnés en 80 échantillons par chromatographie liquide sous haute pression. Cette technique sépare les molécules d'un mélange liquide: le mélange passe sous pression sur une colonne qui interagit avec les molécules et retarde leur sortie selon leurs propriétés chimiques, ce qui permet leur séparation. Parmi les 10 000 fractions obtenues, 261 étaient actives sur des bactéries ou des cellules cancéreuses en culture.

Une chimiothèque inspirée d'arthropodes

En sélectionnant les fractions les plus actives, Entomed a identifié une cinquantaine de molécules par spectroscopie par résonance magnétique nucléaire. Cette technique consiste à appliquer un champ électromagnétique pulsé sur les molécules pures en solution. Les atomes absorbent l'énergie et la relâchent, ce qui fait entrer leur spin nucléaire (le moment magnétique de leur noyau) en résonance à une fréquence caractéristique. L'analyse des fréquences et de leurs corrélations permet de reconstituer l'environnement chimique de chaque atome et, de là, la structure tridimensionnelle des molécules.

Les molécules découvertes n'étaient pas toutes utilisables pour développer un médicament. Seules les molécules nouvelles, facilement synthétisables et actives ont servi de point de départ pour fabriquer, par chimie médicinale, des analogues plus

performants et plus stables. Cette discipline consiste à greffer des fonctions chimiques à des endroits clés des molécules pour améliorer leurs performances. La méthaqualone, par exemple, un sédatif et relaxant musculaire synthétique très utilisé dans les années 1960 aux États-Unis (et aujourd'hui retiré du marché à cause de ses effets aphrodisiaques), s'est révélé être un analogue plus actif et plus stable que la glomérine, une molécule sécrétée par le myriapode *Glomeris nipponica*.

Cette molécule protège l'arthropode en endormant ses prédateurs. Réduit en poudre, le myriapode est utilisé dans la médecine traditionnelle chinoise comme relaxant des muscles et des tendons. La méthaqualone, synthétisée en 1955 en Inde lors d'une recherche de molécules contre le paludisme, diffère de la glomérine par un groupe phényle méthylé (C_7H_9) ajouté sur un des deux atomes d'azote de la glomérine. Les atomes d'azote constituent des points d'ancrage pour de nombreux groupes fonctionnels intéressants en chimie médicinale.

Entomed a ainsi constitué une chimiothèque de 14 000 molécules avec les molécules découvertes chez les arthropodes et leurs dérivés. Cette chimiothèque a été assemblée en microplaques afin de cribler automatiquement ses activités antimicrobiennes et anticancéreuses.

Plusieurs molécules actives sont ainsi passées en phase de développement: pour ces molécules, de nouveaux analogues

améliorés ont été synthétisés, puis criblés systématiquement *in vitro* et *in vivo*. Deux séries de molécules optimisées ont montré une bonne efficacité sur des tumeurs solides et la leucémie *in vivo* chez la souris, et étaient prêtes à passer en phase préclinique. Malgré ces résultats rapides et encourageants, Entomed n'a pas réussi à lever de nouveaux fonds en capital-risque et a cessé son activité en 2005.

Un approvisionnement limité

D'autres entreprises dans le monde ont mené des programmes de recherche sur le potentiel thérapeutique des molécules d'insectes, telles Entocism en Australie et Entopharm en Russie. Cette dernière a commercialisé en 2005 le premier médicament issu d'insectes. Il s'agit de l'alloferon, un peptide naturel de 13 acides aminés isolé de la mouche *Calliphora vicina*. L'alloferon augmente la production d'interférons, des protéines exprimées par les cellules du système immunitaire des vertébrés lors d'une infection virale; les interférons activent les macrophages et les lymphocytes NK, qui détruisent les cellules étrangères. En d'autres termes, l'alloferon réprime les effets des infections virales en améliorant les défenses immunitaires naturelles. Commercialisé en Russie, l'alloferon semble particulièrement efficace contre les maladies virales chroniques invalidantes telles que l'herpès génital ou les hépatites B et C.

En France, la Société VenomeTech recherche de nouveaux médicaments contre la douleur à partir des peptides de venins d'araignées, et MeliPharm développe des miels naturellement enrichis en molécules ou en fractions antibiotiques et procicatrisantes.

Le principal frein à la recherche de nouvelles molécules thérapeutiques chez les insectes est l'approvisionnement en insectes. Il est assez facile de rechercher des molécules de plante ou de micro-organisme, car on peut les localiser, les prélever à nouveau ou les cultiver. Ce n'est pas le cas des insectes. Ce n'est pas le cas des insectes, qui sont petits et pèsent en moyenne 50 milligrammes. En outre, les métabolites secondaires des insectes susceptibles d'avoir des propriétés thérapeutiques se retrouvent à faible concentration: de 0,01 à 0,001 pour cent. La résonance magnétique nucléaire est la seule technique permettant d'identifier la structure d'une molécule inconnue

en milieu liquide, et il est nécessaire de disposer de 0,2 milligramme de molécule pure. La quantité minimale d'insectes pour identifier une molécule est donc de 10 à 20 grammes, soit 300 individus par espèce.

En outre, bien qu'il soit assez simple de récolter un grand nombre d'espèces d'insectes, c'est souvent en petite quantité. En forêt tropicale, à l'aide d'un piège lumineux nocturne, on peut capturer 300 espèces différentes en une seule nuit, mais la plupart ne seront représentées que par quelques individus, voire un seul. Les élevages d'insectes existent, mais lorsque l'on ne connaît pas la biologie de l'espèce ciblée, la mise au point de leurs conditions d'élevage peut prendre des mois, voire être impossible techniquement. Or c'est le cas pour la majorité des insectes, à l'image du plus grand coléoptère du monde, le titan (*Titanus giganteus*), un longicorne de la forêt amazonienne mesurant 20 centimètres de longueur ! Le retour à la source de récolte est également difficile, car les insectes bougent. Ils sont abondants certaines années et quasi absents d'autres, sans que l'on puisse toujours expliquer les raisons de ces fluctuations.

Un énorme réservoir médical inexploré

En raison de ces difficultés d'approvisionnement, les insectes ont fait l'objet de peu d'études pharmacologiques. En comptant large, 3 000 espèces appartenant à 150 familles ont été partiellement analysées. Comment exploiter ce potentiel ?

La première approche consisterait à vérifier les activités *in vitro* des insectes utilisés en médecine traditionnelle dont les indications convergent entre continents, et à isoler leurs molécules actives. La seconde approche serait de poursuivre des recherches sur des groupes d'arthropodes connus pour leurs molécules actives. Les araignées, scorpions et hyménoptères produisent autant de venins que d'espèces, réputés pour leur action sur le système nerveux central, et chaque venin est constitué de plusieurs peptides. Chaque espèce d'araignée synthétise ainsi des centaines de peptides différents dans son venin, et seules 100 espèces sur près de 40 000 ont été analysées.

Les insectes aposématiques sont aussi une piste prometteuse, leurs molécules de défense et leur toxicité étant souvent associées à des propriétés anticancéreuses. Les insectes des sols, les insectes coprophages (mangeurs d'excréments), mycétophages

(mangeurs de champignons) ou associés aux cadavres, par exemple, pourraient fournir des molécules antibiotiques, car ils sont en contact étroit avec des micro-organismes. On pourrait, enfin, tirer parti des insectes hématophages – buveurs de sang –, dont les molécules salivaires interagissent avec la cascade de coagulation, la vasodilatation ou la douleur.

Une troisième approche pourrait être génomique : comme dans tout organisme vivant, les molécules actives des insectes sont synthétisées grâce à un ensemble d'enzymes qui découlent de l'information contenue dans le génome. En produisant ces enzymes dans des bactéries (après avoir repéré et reproduit leur gène) et en étudiant leur activité sur des précurseurs des molécules actives, on mettrait peut-être en évi-

AVEC UN MILLION D'ESPÈCES CONNUES

et plus de quatre millions restant à découvrir, les arthropodes terrestres représentent le plus gros réservoir inexploré de médicaments.

dence de nouveaux outils pour la synthèse de molécules actives. Cette approche a été menée avec succès en 2002 par Jörn Piel, de l'Institut Max Planck d'écologie chimique de Iéna, en Allemagne, chez un insecte du genre *Paederus*. Certains gènes des enzymes de synthèse de la pederine, une molécule de défense très toxique, ont été isolés.

Enfin, une dernière approche consisterait à effectuer des criblages d'activités sur des espèces prélevées au hasard. Des criblages miniaturisés, ne nécessitant que des concentrations infimes, pourraient être menés sur des spécimens uniques. J'ai montré la faisabilité de cette technique. Un tel criblage ne permet pas d'identifier les molécules actives, mais d'orienter les recherches sur des groupes inexplorés. À l'avenir, il est probable que la miniaturisation et la puissance des systèmes de résonance magnétique nucléaire permettront d'identifier des molécules à partir d'un seul insecte de petite taille.

Moins de 0,5 pour cent des arthropodes terrestres ont été étudiés, mettant déjà en évidence des molécules pharmacologiquement actives variées : le potentiel de découverte de nouvelles molécules est élevé. Avec 1 600 familles, un million d'espèces connues et plus de quatre millions restant à découvrir, les arthropodes terrestres représentent le plus gros réservoir inexploré de médicaments.

L'AUTEUR



Roland LUPOLI, entomologiste, a travaillé au sein de la Société Entomede de 2001 à 2005. Il collabore avec le Muséum national d'histoire naturelle et travaille à l'Université Paris Descartes dans l'Unité INSERM UMR-S747 Pharmacologie, toxicologie et signalisation cellulaire.

BIBLIOGRAPHIE

R. Lupoli, *L'insecte médicinal*, Éditions Ancyrosoma, 2010 (<http://ancyrosoma.free.fr>).

I. Eisner *et al.*, *Secret weapons – Defenses of Insects, Spiders, Scorpions, and Other Many-Legged Creatures*, Belknap Press of Harvard University Press, 2005.

E. Motte-Florac, *Les insectes dans la tradition orale*, J.M.C. Thomas Eds., 2003.

R.S. Root-Bernstein et M. Root-Bernstein, *Honey, Mud, Maggots and Other Medical Marvels – The science behind folk remedies and old wives' tales*, Macmillan Interactive Publishing, 1999.

Les débuts de la culture en Europe

Michael Bolus
et Nicholas Conard

Les grottes du Jura souabe, en Allemagne, ont livré des œuvres vieilles de 40 000 ans qui attestent d'une culture élaborée chez les premiers Européens anatomiquement modernes.

Que nous reste-t-il des hommes préhistoriques ? Des pierres taillées et quelques os ? Pas seulement, car les cultures aussi laissent des fossiles. Il y a entre 30 000 et 40 000 ans, une culture avancée s'est épanouie dans la petite chaîne de montagnes entourant la ville d'Ulm, que l'on nomme le Jura souabe. Les grottes de ce massif du Sud-Ouest de l'Allemagne ont en effet livré plusieurs dizaines d'objets prouvant que les porteurs de cette première culture souabe ont utilisé durant une très longue période des techniques et un système symbolique complexes. Ils constituent ensemble le fossile d'une culture, que seul un haut niveau de cognition a pu rendre possible. Quelle est cette culture ? Difficile à dire, mais nous pouvons au moins illustrer certains de ses traits les plus frappants et ressentir leur proximité avec la nôtre.

La culture que nous allons présenter remonte à l'Aurignacien. Première culture



du Paléolithique supérieur, l'Aurignacien se caractérise par un certain type d'outils de pierre et, plus rarement, en matière organique. Elle est apparue en Europe il y a quelque 40 000 ans. Définie d'après le site éponyme d'Aurignac, en Haute-Garonne, cette culture est associée à l'arrivée des hommes anatomiquement modernes en Europe. Elle a disparu il y a environ 28 000 ans pour être remplacée par le Gravettien. Sans doute originaires du Proche-Orient, les ancêtres des Aurignaciens ont notamment remonté le couloir danubien jusqu'à l'Europe de l'Ouest, encore habitée par de rares Néandertaliens.

Au XX^e siècle, lors de fouilles de sites aurignaciens français (Isturitz et d'autres), les préhistoriens avaient déjà découvert des objets d'art et des instruments de musique illustrant la créativité et l'habileté des arrivants. Toutefois, ces signes de cognition supérieure ne sont nulle part aussi évidents que dans le Jura souabe, et plus précisément dans les vallées de la Lone et de l'Ach (voir la figure 3). Là, sept grottes ont livré jusque tout récemment de nombreux objets, que les datations au radiocarbone et les comparaisons typologiques font remonter à un passé compris entre 35 000 et 30 000 ans, voire dans certains cas jusqu'à 40 000 ans. Les artefacts du Jura souabe figurent ainsi parmi les plus anciens vestiges de l'Aurignacien, et ils sont aussi les plus spectaculaires...

Ces découvertes suggèrent qu'au début du Paléolithique supérieur, toute une série d'innovations culturelles et techniques se sont produites dans le Jura souabe. Apparemment, le phénomène n'a pas d'équivalent au cours de la période culturelle précédente: il semble que le Jura souabe ait été l'un des foyers d'innovation du Paléolithique supérieur à l'origine de la modernité culturelle.

Qu'entend-on par là? Le concept de modernité culturelle désigne un ensemble de traits culturels partagés par les socié-

tés de chasseurs-cueilleurs actuelles. Même si elles vivent en des lieux distincts et ont des cultures différentes, ces sociétés ont des points communs: un langage complexe, un système de croyances, un système de liens sociaux et économiques. En simplifiant, on peut dire que l'expression «modernité culturelle» désigne une étape de l'évolution à partir de laquelle une culture devient comparable à la nôtre.

Au sein des groupes humains culturellement modernes, l'existence n'est pas seulement occupée par la quête de nourriture, la recherche d'un abri ou la reproduction, mais par tout un éventail d'activités culturelles. Les bijoux, les figurines et les instruments de musique que façonnent les membres de telles sociétés attestent de leur aptitude à se représenter la réalité à l'aide de concepts (des représentations mentales d'aspects de la réalité) associés à des symboles tels que des suites de sons (mots, airs de musique), des signes graphiques, des gestes, des statues, etc. Tout cela forme ce que l'on nomme la pensée symbolique.

Objets symboliques vieux de 40 000 ans

Les objets symbolisant un aspect de la réalité (figurines) ou façonnés pour produire des symboles, par exemple sonores (instruments de musique), sont des manifestations de la modernité culturelle. Selon les indices disponibles de nos jours, ils apparaissent pour la première fois à l'arrivée des *Homo sapiens* en Europe, il y a quelque 40 000 ans.

Dans un passé plus reculé, on ne retrouve dans les traces laissées par les hommes anatomiquement modernes que des débuts de modernité culturelle. Depuis l'Eurasie, ces traces de modernité culturelle passent par le Proche-Orient, il y a environ 100 000 ans, puis peuvent être suivies en Afrique jusque vers 80 000 ans (les plus anciens fossiles d'hommes modernes datent de quelque 200 000 ans). En Afrique du Sud, dans l'abri de Blombos, Christopher Henshilwood, de l'Université du Witwatersrand, a par exemple trouvé ce qui fait penser à un symbole graphique – un motif à base de traits réguliers sur un morceau d'ocre vieux de 75 000 ans. Pour autant, ni le lieu ni la période de naissance de la modernité culturelle ne sont bien définis.

Dans le Jura souabe, les premières découvertes de figurines remontent

LES AUTEURS



Michael BOLUS et Nicholas CONARD, préhistoriens, sont professeurs à l'Institut de recherche sur la préhistoire ancienne et l'écologie du Quaternaire de l'Université de Tübingen, en Allemagne.

L'ESSENTIEL

✓ On a découvert dans le Jura souabe de nombreux artefacts. Vieux de 35 000 ans, ils constituent des «fossiles culturels» laissés par les premiers hommes anatomiquement modernes d'Europe.

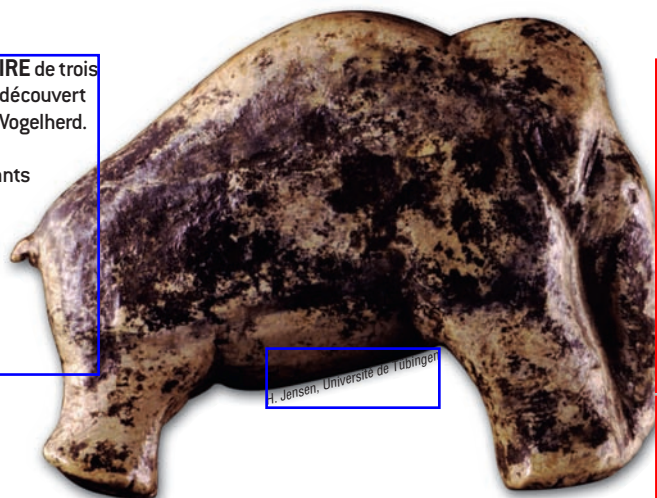
✓ Parmi ces objets, on trouve des figurines représentant des animaux, des humains ou des êtres hybrides.

✓ Des flûtes en os ou en ivoire attestent d'un grand savoir-faire dans la facture d'instruments de musique.

✓ Tous ces objets reflètent une culture que l'on peut qualifier de moderne.

1. LA VÉNUS DU HOHLE FELS, une figurine féminine de six centimètres de haut en ivoire de mammoth, a été découverte en 2008 dans la grotte du Hohle Fels. Particulièrement soulignées, les représentations de ses organes génitaux suggèrent qu'elle symbolisait la sexualité et la fertilité. Équipée en haut d'un anneau, elle constituait sans doute une sorte d'amulette qui se portait en pendentif. Datée entre 40 000 et 35 000 ans, elle est la plus ancienne œuvre anthropomorphe de l'humanité.

2. CE MAMMOUTH D'IVOIRE de trois centimètres de long a été découvert en 2007 dans la grotte de Vogelherd. Sans doute témoigne-t-il de la familiarité des habitants du Jura souabe avec le mammouth, qu'ils chassaient parfois pour sa viande et dont ils exploitaient l'ivoire pour en fabriquer toutes sortes d'objets.



H. Jensen, Université de Tübingen

En 1931, Gustav Riek, un préhistorien de l'Université de Tübingen, fouille alors la grotte du Vogelherd, dans la vallée de la Lone. Il met au jour une douzaine de figurines de quelques centimètres de haut taillées dans de l'ivoire de mammouth. Datées d'il y a 32 000 à 36 000 ans, elles représentent surtout de grands animaux, tels des mammouths, des chevaux ou encore des félins. Depuis, les fouilles du même site ont livré d'autres figurines, dont une sculpture très bien conservée de mammouth (voir la figure 2).

C'est ensuite la grande découverte faite dans la grotte du Hohlenstein-Stadel (voir la figure 4) qui attirera l'attention, mais pas immédiatement... Peu avant la Seconde Guerre mondiale, on avait prélevé dans cette cavité quelque 200 éclats d'ivoire. Assemblés en 1969, il s'avère qu'ils for-

ment une œuvre fascinante. Haute d'une trentaine de centimètres, cette petite statue mélange les caractères d'un homme et ceux d'un lion. Or un tel homme-lion relève d'un type de représentation fréquent dans l'art paléolithique : celui des êtres hybrides mi-animaux, mi-hommes. Toutefois, tant la taille que l'ancienneté de l'homme-lion du Hohlenstein-Stadel lui confèrent un statut unique.

La grotte du Hohle Fels, près de la ville de Schelklingen (voir les figures 3 et 6), nous a aussi offert un grand trésor de l'art aurignacien. Les fouilles de 1999 ont d'abord livré une petite tête d'animal en ivoire, vieille de quelque 30 000 ans, qui s'intègre bien dans la série des objets découverts jusque-là dans le Jura souabe. Une couche un peu plus profonde que celle qui a donné cette tête a ensuite livré une figurine d'oiseau aquatique, puis une autre, haute de trois centimètres seulement (voir la figure 4), qui évoque l'homme-lion du Hohlenstein-Stadel !

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Marean, *Quand la mer sauva l'humanité, Pour la Science*, n° 396, octobre 2010.

N. Conard et J. Wertheimer, *Die Venus aus dem Eis*, Knaus, Munich, 2010.

M. Vanhaeren et F. d'Errico, *Aux origines de la parure, Pour la Science*, n° 369, juillet 2008.

Des êtres hybrides...

En effet, malgré la différence de taille, la ressemblance est frappante. Les deux statuettes sont si similaires que l'idée s'impose que des représentations mentales analogues sont à l'origine de la réalisation de chacune des œuvres. À ce stade, il nous faut insister sur le fait que la probabilité de trouver deux fois la même représentation dans les quelques centaines de kilomètres carrés de sols hérités de l'Aurignacien souabe est infime. La découverte de deux hommes-lions, l'un dans la vallée de l'Ach et l'autre dans celle de la Lone, suggère fortement que les représentations de ce genre ne manquaient pas dans le Jura souabe... S'il en est ainsi, c'est bien parce qu'elles représentaient un phénomène répandu dans l'art aurignacien de la région. Qu'en déduire, sinon que l'idée de transition entre animal et humain jouait un rôle important dans le système de croyances des Aurignaciens du Jura souabe ?

Cette impression conduit à l'une des interprétations possibles d'une autre œuvre : l'Adorant. Réalisé sur une plaquette d'ivoire (voir la figure 4), ce petit bas-relief trouvé dans la grotte du Geissenklösterle représente un homme debout, apparemment en position d'adoration. Sa surface est malheureusement trop dégradée pour que cela soit avéré, mais nous pensons que l'Adorant pourrait aussi représenter un être



3. LE JURA SOUABE est une petite chaîne de montagnes située au Sud-Ouest de l'Allemagne, face à l'Alsace. Limité au Sud-Est par le Danube, ce petit massif était manifestement très intéressant pour les chasseurs-cueilleurs, sans doute à cause de ses nombreuses grottes, où ils pouvaient guetter le passage des chevaux, des rennes et autres herbivores de la grande steppe à mammouths. Après les Néandertaliens, des hommes anatomiquement modernes de culture aurignacienne y ont vécu plus de 10 000 ans. Ils ont laissé de nombreuses productions culturelles attestant de l'usage de symboles et de techniques élaborées, notamment dans la facture d'œuvres figuratives, d'armes ou d'instruments de musique.

hybride mi-animal, mi-homme. Il a été trouvé en même temps que des représentations d'ours, de mammouth et de bison.

La série des figurines aurignaciennes du Jura souabe compte pour l'heure une cinquantaine d'objets. Les œuvres représentent en général des animaux, que l'on reconnaît à des traits caractéristiques, souvent très détaillés, et que l'on peut en général ranger dans une catégorie animale. Cela n'est toutefois pas toujours possible, d'une part parce que l'on ne découvre souvent que des fragments, d'autre part parce que, manifestement, les artistes préhistoriques ne prenaient pas toujours pour modèle des animaux réels, mais aussi des êtres hybrides...

Presque toujours, les figurines ont été soigneusement polies, puis enrichies de rainures et de creux. S'agissait-il là de rendre les pelages ou plutôt de signes symboliques, que nous ne savons pas décrypter ? Difficile à dire, mais la signification de ces enrichissements était claire pour les Aurignaciens du Jura souabe. Quoi qu'il en soit, tout cela témoigne de l'existence d'un système complexe de communication symbolique et, par là, d'un niveau de cognition jamais attesté auparavant, que ce soit chez les Néandertaliens ou chez les hommes anatomiquement modernes hors d'Europe.

...et une opulente Vénus

Étant donné le nombre des figurines aurignaciennes du Jura souabe, les découvertes renouvelées de représentations d'êtres hybrides, mais jamais d'êtres humains, ne pouvaient qu'étonner. La situation change en 2008, quand six fragments d'ivoire, d'au moins 35 000 ans et plus probablement de 40 000 ans d'âge, sont découverts dans la grotte du Hohle Fels. Assemblés, ils s'avèreront former une statuette détaillée, la représentation de six centimètres de haut d'une femme corpulente : la Vénus du Hohle Fels, la plus ancienne représentation féminine (et humaine !) connue (voir la figure 1).

Un anneau soigneusement façonné et placé de façon légèrement asymétrique sur les larges épaules occupe la place de la tête et du cou. Sa présence suggère que la Vénus du Hohle Fels constituait une sorte d'amulette ou de bijou se portant en pendentif. Les volumineux seins sont dressés ; les bras reposent sur le ventre. Les doigts se dis-



tinguent bien ; les jambes, courtes, se terminent en pointe. Le ventre et le dos portent des entailles profondes et horizontales qui évoquent peut-être un habit. La vulve est fortement marquée, ce qui suggère que la Vénus du Hohle Fels symbolisait la sexualité et la fertilité.

Jusqu'à présent, on ne connaissait de Vénus comparables que dans le Gravettien, la culture matérielle qui succède à l'Aurignacien et le remplace. La plus connue est celle de Willendorf, en Autriche, qui date d'environ 25 000 ans avant notre ère. La trouvaille du Hohle Fels prouve donc que la tradition de ce genre de représentations féminines remonte 10 000 ans plus loin dans le temps, c'est-à-dire jusqu'au début du Paléolithique supérieur européen.

Les figurines d'âges comparables à celles du Jura souabe sont rares. Une autre Vénus aurignacienne, la Vénus du Galgenberg, a été trouvée à Stratzing, en Autriche, dans une strate datée à -32 000 ans ; elle est donc presque aussi ancienne que la Vénus du Hohle Fels. Haute de 7,2 centimètres, dotée d'une tête, elle a été taillée dans une pierre plate en serpentine (une roche verte), de sorte qu'il ne s'agit pas d'une représentation tridimensionnelle.

À Fumane, en Italie du Nord, des blocs calcaires couverts de peintures quasi abstraites d'animaux difficiles à identifier ont par ailleurs été signalés. Sur le même lieu, les préhistoriens ont découvert une figurine anthropomorphe, représentant probablement elle aussi un être hybride. Des représentations simples d'animaux et de vulves sculptées dans la pierre ont aussi été trouvées en France.

Enfin, une bonne partie des spectaculaires peintures pariétales de la grotte Chauvet, dans la vallée de l'Ardèche, est aussi aurignacienne : datées de plus de 30 000 ans, elles ont été réalisées dans un style comparable à celui utilisé dans le Jura souabe.

En 1990, une découverte spectaculaire dans la grotte du Geissenklösterle, près de Blaubeuren, en Allemagne, a suscité un grand intérêt : il s'agissait de deux morceaux de flûtes datant de jusqu'à 35 000 ans avant notre ère ! Le plus complet, un morceau d'os d'aile de cygne de 13 centimètres de long, a pu être reconstitué à partir de 23 fragments. Il illustre le niveau élevé de cognition atteint par les hommes anatomiquement modernes dans le Jura souabe.

Dans la strate même où ce morceau fut retrouvé se trouvaient 31 autres fragments. Leur assemblage, accompli en 2004,



L. LUDWIG - UNIVERSITÄT DE TÜBINGEN

5. CES FLUTES prouvent que les Aurignaciens du Jura souabe produisaient des sons, qu'ils combinaient sans doute pour faire de la...musique. En d'autres termes, ils produisaient un langage symbolique sonore. Ci-dessus, ce morceau de flûte, taillée dans un bloc d'ivoire de mammoth, a été découvert en 2004 dans la grotte du Geissenklösterle. Cet objet atteste d'un savoir-faire remarquable. À gauche, une flûte complète, taillée dans un os long d'aile de vautour, a été mise au jour en 2008 dans la grotte du Hohle Fels.



L. LUDWIG - UNIVERSITÄT DE TÜBINGEN

6. LA GROTTES DU HOHLE FELS, c'est-à-dire du « rocher creux » en allemand, est fouillée depuis les années 1970. Le site est si important que les chercheurs de l'Université de Tübingen qui l'étudient ont pris soin de l'équiper d'un système d'éclairage et de chemins de circulation hors sol afin de pouvoir travailler soigneusement. Outre un matériel lithique et osseux caractéristique de la couche culturelle aurignacienne, cette grotte a livré de nombreux témoins matériels d'une modernité culturelle, notamment des figurines représentant des animaux, dont un oiseau aquatique, puis celle d'un homme mi-animal, mi-humain et, enfin, la Vénus du Hohle Fels, la plus ancienne représentation humaine qui nous soit parvenue.

a révélé qu'ils faisaient aussi partie d'une flûte (voir la figure 5). L'instrument n'est pas en os, mais taillé dans l'ivoire d'une défense de mammoth. Le fait est remarquable, car si le façonnage d'une flûte à partir d'un objet naturel ayant une forme favorable exige déjà beaucoup d'expérience et d'habileté, celui d'un tel instrument dans un bloc massif d'ivoire est une prouesse technique, dont seul un véritable facteur d'instruments est capable.

C'est pourquoi nous nous sommes particulièrement réjouis, quand, à l'été 2008, nous avons découvert une flûte entière dans la grotte du Hohle Fels. Façonnée dans l'os d'une aile de gypaète barbu (le plus grand des vautours), elle était juste à une longueur de bras de l'endroit où avait été trouvée la Vénus du Hohle Fels. Après l'assemblage des fragments, l'objet, de 22 centimètres de long, s'est avéré comprendre cinq trous et un bec complet. Il date de quelque 40 000 ans, ce qui en fait le plus vieil instrument de musique du monde (voir la figure 5).

Sa finition technique et acoustique est remarquable. Les répliques d'os et d'ivoire des flûtes du Hohle Fels et du Geissenklösterle permettent de produire des notes et des mélodies complexes. Cela fait des flûtes du Jura souabe des instruments de musique de facture comparable à ceux de notre temps. Si une telle maîtrise dans la réalisation d'instruments existait déjà il y

a 40 000 ans, on peut supposer que ce remarquable artisanat préhistorique remonte encore plus loin dans le temps.

Qui sait ? Des précurseurs en bois de ces flûtes avaient peut-être existé bien plus tôt, et avaient disparu depuis longtemps quand les flûtes du Jura souabe en ivoire ou os ont été façonnées. Et il n'est guère raisonnable de penser que les hommes paléolithiques ne jouaient de la musique que dans le Jura souabe. Certes, toutes les flûtes en ivoire préhistoriques proviennent de l'Aurignacien souabe (il y a bien une flûte en os française d'âge comparable, mais sa datation est incertaine), mais la découverte de tels instruments en d'autres endroits n'est sans doute qu'une question de temps.

Quoi qu'il en soit, on peut aujourd'hui affirmer qu'au début du Paléolithique supérieur, que ce soit dans le Jura souabe ou dans d'autres régions telles que l'Italie ou le Sud-Ouest de la France, de nombreuses innovations culturelles apparaissent ; elles ont des caractéristiques régionales, de sorte qu'elles traduisent sans doute des identités culturelles différentes. Pour autant, entre 40 000 et 35 000 ans avant notre ère, peu de temps après l'arrivée des premiers hommes anatomiquement modernes en Europe, les figurines et les instruments de musique faisaient incontestablement partie du fonds culturel européen.

Une modernité à l'origine du succès démographique ?

Les découvertes du Jura souabe indiquent que l'homme anatomiquement moderne de l'époque aurignacienne avait développé une diversité culturelle comparable à celle des sociétés ultérieures. Les Néandertaliens qui, au Paléolithique moyen, occupaient la plus grande partie de l'Europe ne sont pas allés aussi loin. C'est pourquoi nous pensons que la présence de nos ancêtres de l'âge de pierre a poussé les Néandertaliens, peu nombreux, vers l'extinction, non seulement parce que *Homo sapiens* fabriquait des armes et des outils plus performants, mais aussi parce que le langage symbolique, attesté par les bijoux, figurines et instruments de musique qu'il employait, lui procurait nombre d'avantages. C'est la modernité culturelle qui est à l'origine du succès démographique de l'homme anatomiquement moderne pendant l'Aurignacien.

Parlons-en !

Les grands débats

proposés par le CNRS, en partenariat avec
le musée du quai Branly

Lanceurs d'alerte : les scientifiques en première ligne

Jeudi 6 octobre 2011 à 19 heures

Salon de lecture Jacques Kerchache, musée du quai Branly

Entrée libre. Informations sur www.cnrs.fr/lesgrandsdebats

Suivez le débat en ligne dès 19 heures
sur www.20minutes.fr



www.cnrs.fr



*musée du quai Branly
100 rue de la Vierge 75013 Paris



POUR LA
SCIENCE

La percolation, un jeu de pavages aléatoires

Hugo Duminil-Copin

Dans les modèles de percolation, un réseau aléatoire est traversé d'un bout à l'autre. Ces modèles sont en lien étroit avec l'étude de la symétrie conforme, un champ très actif des mathématiques et de la physique théorique.

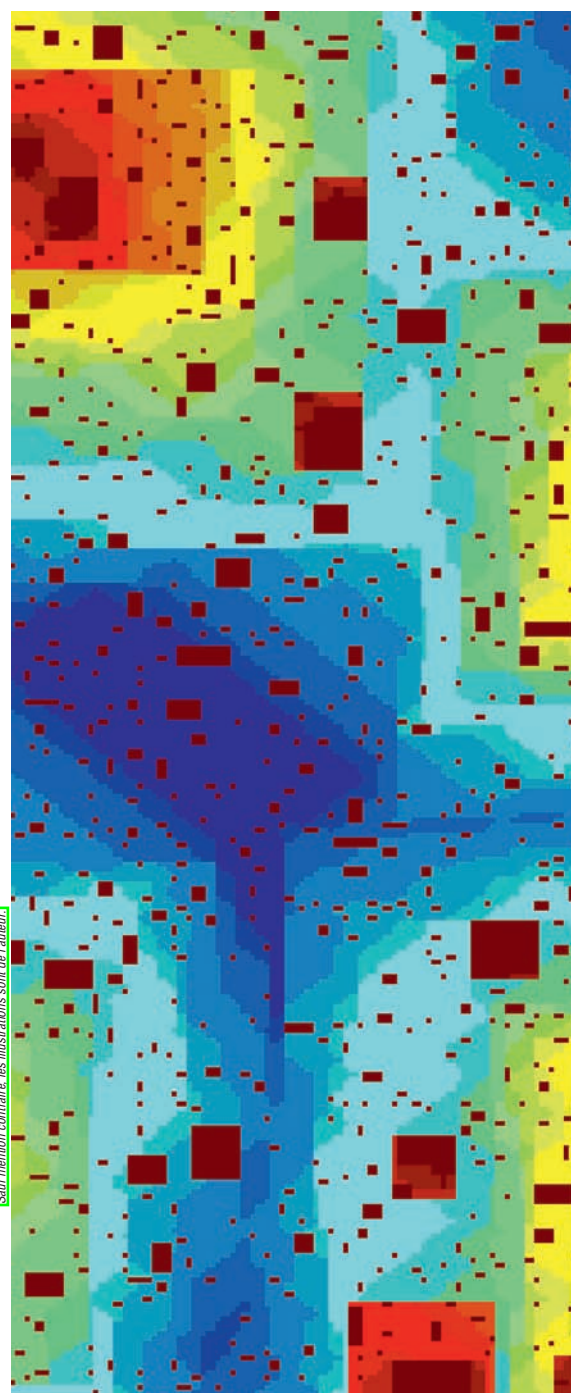
Maxime fait face à sa cuisine, songeur. Sa famille l'a chargé d'une mission de la plus haute importance : carreler la pièce avec des dalles hexagonales. Comme si cela ne suffisait pas, ses enfants se sont disputés pour le choix des couleurs, jaune ou bleu (les enfants ont parfois des goûts surprenants). Comme Maxime n'aime pas les conflits, il a décidé de choisir la couleur des dalles aléatoirement et équitablement. Chaque fois qu'il posera une dalle, il choisira sa couleur en tirant à pile ou face.

Il lance une pièce de monnaie : pile ! Le premier carreau est jaune. Il le pose dans le coin le plus éloigné de la porte. Il relance sa pièce : face ! Le carreau adjacent au précédent est bleu. Très rapidement, Maxime s'interroge sur le résultat final, non pas sur la beauté de sa future cuisine, mais plutôt sur son aspect ludique (voir la figure 2). Par exemple, lui sera-t-il possible de traverser la pièce en ne marchant que sur des hexagones bleus contigus ? Ou, s'il préfère marcher sur les lignes séparant les hexagones bleus des hexagones jaunes, combien de pas lui faudra-t-il, en partant de la porte, pour atteindre le mur opposé ?

Sous leur apparence ludique, les questions de Maxime intéressent mathématiciens et physiciens depuis plus d'un siècle. Le coloriage aléatoire d'un réseau – ici les hexagones forment un réseau en nid d'abeilles – est un modèle dit de percolation (du latin *percolare*, couler à travers). L'origine étymologique de ce modèle est la percolation d'un liquide à travers une matière poreuse, par exemple l'eau à travers du café moulu.

La véritable étude scientifique des modèles de percolation a débuté avec les travaux de l'ingénieur Simon Broadbent et du mathématicien John Hammersley.

1. LA THÉORIE DE LA PERCOLATION s'applique à l'étude de phénomènes tels que la propagation d'un feu de forêt. Dans le modèle illustré ici, dit de percolation « bootstrap », chaque case élémentaire représente un arbre. À partir d'une configuration initiale où certains arbres, pris au hasard, sont en feu, la forêt évolue selon une règle simple : un arbre intact à l'instant t prend feu à l'instant $t + 1$ si deux au moins de ses voisins immédiats sont en feu (ici, les arbres ayant brûlé en premier sont en rouge, ceux ayant brûlé en dernier sont en bleu). On peut alors s'intéresser par exemple à la probabilité que l'incendie finisse par brûler tous les arbres.



en Angleterre. Ils ont introduit en 1957 un tel modèle afin de comprendre comment les poussières pouvaient obstruer les masques à gaz. Depuis, la percolation n'a cessé de susciter l'intérêt des scientifiques, notamment parce qu'on la rencontre sous une forme ou une autre dans de nombreux phénomènes : écoulement d'un fluide dans un matériau poreux, gélification d'un liquide, propagation d'un incendie ou d'une épidémie, passage du courant électrique dans un mélange de matériaux conducteurs et isolants, etc.

Prenons l'exemple des feux de cimes. Ces incendies de forêts sont caractérisés par le fait que le feu se propage d'un arbre à l'autre si leurs feuillages se touchent. Si l'on modélise une forêt par un ensemble

d'hexagones, certains étant occupés par un arbre, d'autres non, l'étude de la propagation de l'incendie revient à étudier les amas d'arbres adjacents. Bien entendu, les feux de cimes ne sont pas les plus fréquents. En général, le feu se propage surtout par les racines et non par le feuillage. Un modèle de percolation n'est donc qu'une caricature de phénomènes complexes.

Un modèle simple, mais riche

Cependant, la simplification permet de dégager certaines propriétés intrinsèques, indépendantes des détails spécifiques du phénomène considéré. Ainsi, il y a quelques années, Bernard Sapoval, à l'École

L'AUTEUR

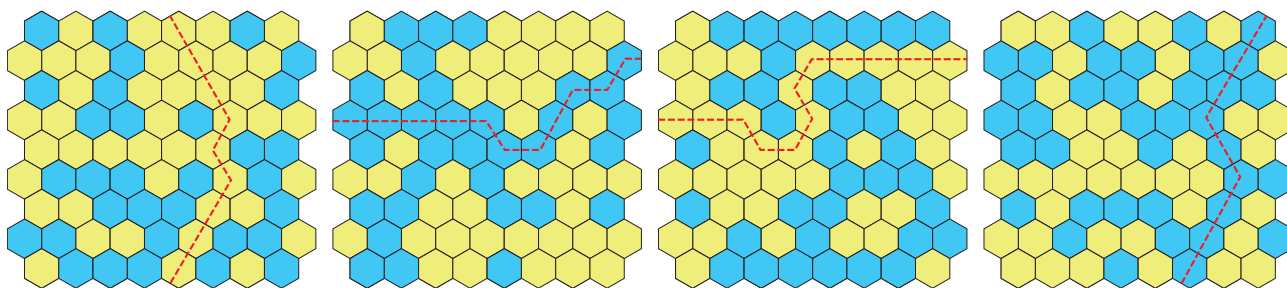


Hugo DUMINIL-COPIN est doctorant en mathématiques à l'Université de Genève, sous la direction de Stanislas Smirnov.



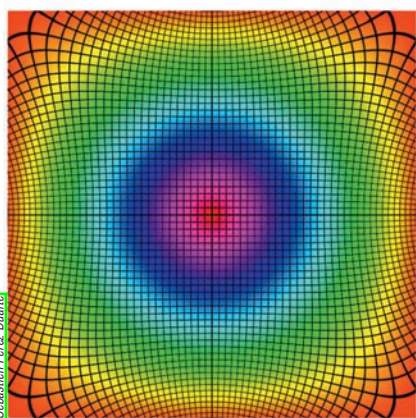
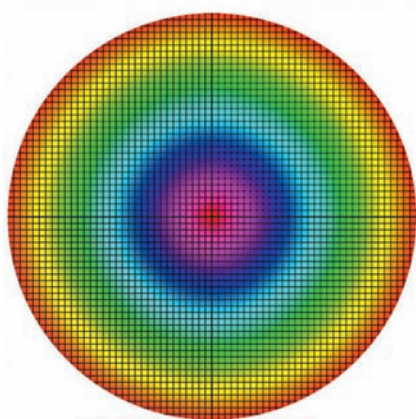
L'ESSENTIEL

- ✓ La percolation désigne, à l'origine, le passage d'un fluide à travers un solide perméable.
- ✓ Pour analyser de tels processus, les scientifiques ont conçu des modèles aléatoires simples, où l'on peut se poser des questions élémentaires.
- ✓ L'étude des modèles de percolation s'est révélée riche et participe au progrès de divers domaines scientifiques.
- ✓ En mathématiques et en physique théorique, les modèles de percolation contribuent aux recherches sur la symétrie conforme.



2. QUATRE PAVAGES POSSIBLES d'une pièce où la couleur des carreaux est tirée au hasard équitablement, à pile ou face. On voit que l'existence d'un chemin d'hexagones bleus (ou jaunes) reliant le côté gauche et le côté droit – un chemin de percolation – empêche l'existence d'un che-

min d'hexagones jaunes (ou bleus) reliant les côtés haut et bas. Le calcul de la probabilité d'avoir un chemin percolant dans un réseau de taille infinie est l'une des questions auxquelles cherchent à répondre les théoriciens de la percolation.



Sébastien Hertz-Ulrich

3. UNE APPLICATION CONFORME est une transformation du plan qui laisse inchangés en chaque point les angles. Les exemples les plus simples sont les translations, les rotations et les homothéties. Mais il existe une infinité de transformations conformes dans le plan [toute fonction injective et analytique d'une variable complexe permet de définir une application conforme]. L'une d'elles est illustrée ici, elle transforme un disque en un carré. Les lignes noires permettent de remarquer que les croisements à angle droit se conservent d'une figure à l'autre. En dimension supérieure à 2, l'ensemble des transformations conformes est beaucoup moins riche.

polytechnique, a étudié les phénomènes de corrosion et a relevé des similarités frappantes avec les propriétés de la percolation (voir la figure 4). Plus récemment, en 2008, la théorie de la percolation a permis à une équipe anglo-néerlandaise de comprendre les épidémies de peste qui frappent les grandes gerbilles au Kazakhstan.

Dans cet article, nous nous limiterons au simple modèle de percolation géométrique que constitue le pavage d'une pièce par des hexagones. Nous verrons que les réponses aux questions de Maxime, et à d'autres du même type, sont surprenantes et font de la percolation un modèle fécond.

Aller d'un côté à l'autre

Revenons à la première question de Maxime. Une fois le carrelage achevé, sera-t-il possible de traverser d'un mur à l'autre en marchant uniquement sur des hexagones bleus adjacents ? Comme Maxime s'est posé la question avant d'avoir carrelé sa cuisine, il ne peut pas affirmer si la pièce sera traversable ou non : le choix de la couleur des carreaux étant aléatoire, il n'a pas l'information nécessaire.

Il est impossible de savoir *a priori* si la pièce sera traversable ou non, mais on peut estimer la probabilité que cela arrive. Un joueur de loto ignore s'il va gagner ou non, mais il peut calculer la probabilité de toucher le gros lot : en tenant compte du fait que tous les numéros ont la même chance d'être le numéro gagnant, la probabilité que le joueur gagne vaut $1/N$, où N est le nombre de numéros possibles (pour le loto français, N est égal à 19 millions environ). Dans notre cas, nous pouvons nous demander également quelle chance a Maxime de pouvoir traverser sa pièce. Le calcul sera bien plus complexe que pour le loto.

Imaginons que la cuisine de Maxime soit carrée. Dans ce cas particulier, le calcul de la probabilité qu'il y ait un chemin allant d'un mur à l'autre est assez simple. On peut remarquer que nous sommes face à une alternative : soit il existe un chemin d'hexagones bleus allant de gauche à droite, soit il existe un chemin d'hexagones jaunes allant de haut en bas qui empêche l'existence d'un chemin d'hexagones bleus allant de gauche à droite (voir la figure 2). De plus, la probabilité d'avoir un chemin jaune traversant de haut en bas est la même que celle d'avoir un chemin bleu traversant de gauche à droite, puisque la pièce est un carré et que le problème reste le même si l'on échange le jaune et le bleu (le choix de la couleur étant fait avec les deux probabilités égales à $1/2$). Ainsi, nous pourrions traverser dans la moitié des cas, ce qui signifie que la probabilité de traverser vaut $1/2$. En conclusion, la question de Maxime admet une réponse élémentaire pour une cuisine carrée et deux couleurs équiprobables.

Dans la suite, sauf mention contraire, on supposera toujours que les deux couleurs ont la même probabilité, ce qui correspond à la percolation dite critique, la situation la plus intéressante et pour laquelle il existe des méthodes d'analyse théorique puissantes (voir l'encadré page 51).

Nous venons de considérer le cas d'une pièce carrée. Qu'advient-il lorsque la pièce n'est plus carrée, mais rectangulaire ? Cette question a été posée pour la première fois en 1894, sous une forme un peu différente, par le mécanicien et mathématicien américain De Volson Wood dans le mensuel *The American Mathematical Monthly*. L'éditeur avait alors commenté : « C'est un très bon problème, et si quelqu'un nous en fournit une solution complète, nous la publierons dans

le prochain numéro. » Il était trop optimiste, car la question est restée ouverte pendant plus d'un siècle...

On peut d'abord noter que l'argument utilisé pour une pièce carrée ne fonctionne plus dans le cas d'un rectangle, puisque la probabilité d'un chemin bleu de gauche à droite n'est plus la même que la probabilité d'un chemin jaune de haut en bas. À vrai dire, il est impossible de calculer exactement la chance de pouvoir traverser. Cependant, on peut s'intéresser à une question très proche.

Quand la taille des carreaux tend vers zéro

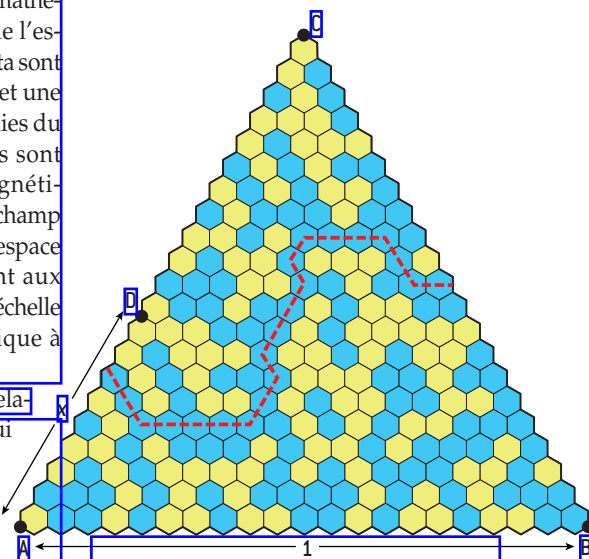
Jusqu'ici, nous n'avons pas précisé la taille de la pièce ou, de façon équivalente, la taille des hexagones. Si Maxime pave sa cuisine carrée de trois mètres sur trois par des hexagones ayant dix centimètres de côté, ou trois centimètres, le raisonnement précédent fait pour la pièce carrée s'applique encore et la probabilité de pouvoir traverser la pièce reste égale à $1/2$. Mais si la cuisine fait trois mètres sur quatre, le résultat dépendra *a priori* de la taille des hexagones.

Poussons le raisonnement plus loin et imaginons un pavage par des hexagones de un micromètre, de un nanomètre, etc. En considérant ainsi des carrelages faits d'hexagones de plus en plus petits, la probabilité de traverser se rapproche de plus en plus d'une valeur qualifiée de probabilité limite. La percolation étant un modèle pertinent seulement pour des systèmes contenant un très grand nombre d'hexagones, l'approximation consistant à supposer que la taille des hexagones tend vers zéro est naturelle. Quelle est la valeur de la probabilité limite pour une pièce rectangulaire ?

La réponse à cette question est venue en plusieurs temps. Tout d'abord, appelons « limite d'échelle » de la percolation le modèle obtenu en faisant tendre vers zéro la taille des hexagones. De nombreux autres modèles de la physique statistique (discipline qui étudie les systèmes composés d'un très grand nombre de particules) admettent une limite d'échelle. Or on montre que la limite d'échelle des modèles bidimensionnels de physique statistique est équivalente, du point de vue mathématique, à une théorie quantique de champs en deux dimensions d'espace où les quanta du champ sont des particules de masse nulle.

Expliquons succinctement ce que cela veut dire. En théorie quantique, les particules telles que les électrons et les photons sont des quanta d'un « champ » approprié. Un champ est une entité mathématique définie en chaque point de l'espace et à chaque instant, et les quanta sont des unités véhiculant une énergie et une quantité de mouvement bien définies du champ. Par exemple, les photons sont les quanta du champ électromagnétique ; ils sont de masse nulle, mais le champ électromagnétique évolue dans un espace à trois dimensions, contrairement aux champs correspondant à la limite d'échelle des modèles de physique statistique à deux dimensions.

En 1984, les physiciens russes Belaïvin, Polyakov et Zamolodchikov, qui ont tous trois Alexander pour prénom, ont présenté des arguments montrant que ces champs bidimensionnels, limites de modèles bidimensionnels de physique statistique lorsque la taille de chaque élément tend vers zéro, ont un immense groupe de symétries : le groupe des « transformations conformes ». Il s'agit des transformations du plan qui conservent en chaque point



4. UN CHEMIN PERCOLANT qui relie, par des hexagones bleus, le bord DA au côté BC d'un réseau en forme de triangle équilatéral. Si les côtés de ce triangle sont de longueur unité, et si la longueur du bord DA est égale à x , la probabilité limite (obtenue quand la taille des hexagones tend vers zéro) qu'il y ait un tel chemin est égale à x .

Transitions de phase et percolation

De nombreux systèmes physiques présentent une transition de phase, c'est-à-dire un changement brutal lorsque l'un des paramètres atteint une certaine valeur. Un exemple en est le changement d'état de l'eau liquide en glace lorsque la température atteint 0°C . Le modèle de percolation présente aussi une transition de phase : un chemin bleu infini traversant d'un côté à l'autre apparaît à partir d'une certaine valeur p_c (égale à $1/2$) de la probabilité du bleu.

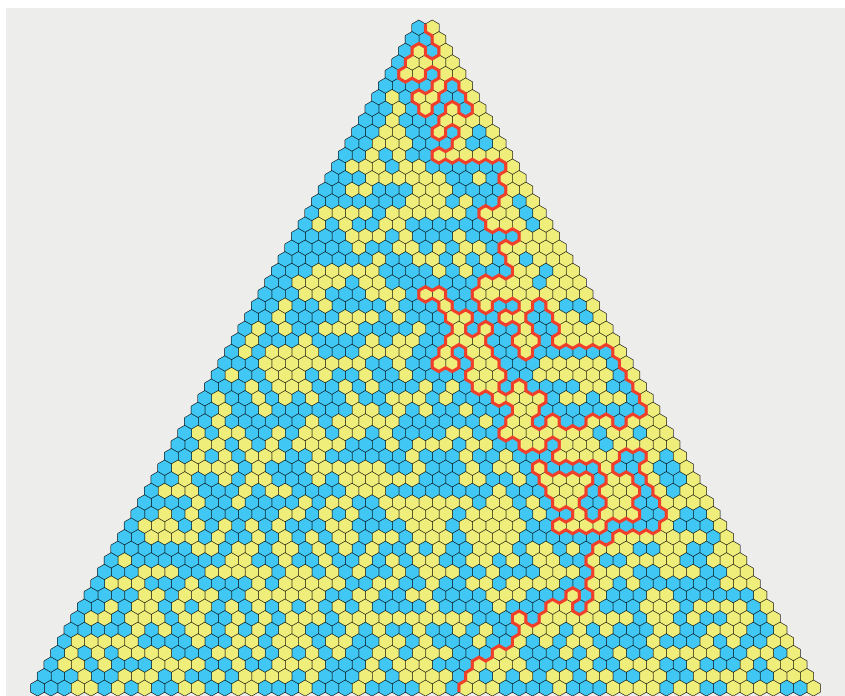
Le comportement d'un système lors d'une transition de phase est décrit par des propriétés macroscopiques du système, des grandeurs dites thermodynamiques. Pour la percolation, on peut par exemple étudier la densité $D(p)$ de l'amas d'hexagones bleus et contigus qui s'étend d'un bout à l'autre du réseau, c'est-à-dire

la proportion moyenne d'hexagones appartenant à cet ensemble. Cette densité vaut 0 pour $p < 1/2$ et est strictement positive pour $p > 1/2$. Étudier la transition de phase, c'est par exemple examiner comment $D(p)$ se comporte lorsque p se rapproche de $1/2$ par valeurs supérieures. En dimension 2 et grâce au résultat d'invariance conforme, on prouve que $D(p)$ décroît vers 0 comme $(p - 1/2)^{5/36}$.

Les travaux de Stanislas Smirnov permettent de comprendre le comportement d'autres grandeurs thermodynamiques du modèle, telle la longueur de corrélation. Cette dernière est une mesure de la distance jusqu'à laquelle deux points du système ont une influence l'un sur l'autre. Au point critique d'un système, la longueur de corrélation tend vers

l'infini selon une loi qu'il est parfois possible de déterminer.

Un autre modèle célèbre de la physique statistique qui présente une transition de phase est le « modèle d'Ising » à deux dimensions. Il consiste à placer aux nœuds d'un réseau plan des atomes ayant un spin (ou moment magnétique) égal à $+1$ ou -1 , chaque spin interagissant avec ses voisins immédiats de façon à ce que les spins tendent à prendre le même signe (une tendance contrecarrée par l'agitation thermique). Ce modèle simule le comportement des matériaux ferromagnétiques. Dans ce cas, les propriétés thermodynamiques intéressantes incluent l'aimantation. S. Smirnov a également étudié ce modèle et prouvé son invariance conforme lorsque le pas du réseau tend vers zéro.



5. UN EXEMPLE DE PROCESSUS D'EXPLORATION, où l'on borde les hexagones jaunes par la gauche (*en rouge*). Dans la limite où la taille des hexagones tend vers zéro, ce chemin devient une courbe aléatoire du type SLE (*Schramm-Loewner Evolution*).

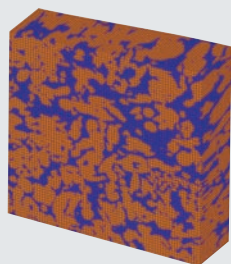
Autres graphes et autres dimensions

La percolation a été décrite dans l'article sur un réseau d'hexagones, mais le terme de percolation se réfère à une famille beaucoup plus large de modèles.

Imaginons un graphe, c'est-à-dire un ensemble de points, appelés sommets, et de lignes, appelées arêtes, reliant certains de ces sommets. Un pavage d'hexagones forme un graphe : les sommets sont les points d'intersection de trois hexagones et les arêtes sont simplement les bordures entre les hexagones. Une percolation par arête sur un graphe est le processus obtenu quand on efface chaque arête avec une certaine probabilité p , toutes choses égales par ailleurs. On obtient alors de nouveau un graphe possédant les mêmes sommets, mais seulement un sous-ensemble de ses arêtes.

On peut aussi considérer la percolation sur une grille (un réseau de carrés). Bien que ce

modèle soit un peu différent du modèle hexagonal décrit dans le corps du texte, il partage avec lui de nombreuses particularités. Par exemple, il présente également une transition de phase ayant les mêmes propriétés que celle de la percolation sur les hexagones.



Cette ressemblance entre des modèles *a priori* différents est nommée universalité : les propriétés macroscopiques de ces systèmes ne dépendent pas de la géométrie locale (hexagonale/carrée), mais seulement de propriétés générales (ici, l'indépendance entre les différentes faces/arêtes).

Par ailleurs, la percolation ne se restreint pas à la dimension 2. On peut par exemple étudier la percolation sur un réseau cubique (*voir la figure*). Elle est beaucoup plus mystérieuse que la percolation sur le réseau plan hexagonal. Le fait d'être en dimension trois complique beaucoup la tâche et certaines questions très élémentaires figurent parmi les conjectures les plus importantes en théorie des probabilités. Remarquons que la dimension trois est celle de l'espace où nous vivons, et il est donc d'autant plus fondamental de la comprendre.

Paradoxalement, la percolation sur des graphes en dimension très supérieure à trois est bien mieux comprise, car ces graphes ressemblent alors à s'y méprendre à des arbres, c'est-à-dire des graphes sans boucles. La percolation sur les arbres est beaucoup plus facile à analyser et a des interprétations en termes de phylogénie.

les angles, mais pas nécessairement les distances. Les exemples les plus simples sont les translations, les rotations et les homothéties, mais il en existe une infinité d'autres (*voir la figure 3*). En fait, on montre que toute fonction analytique f d'une variable complexe z représente une transformation conforme dans le plan (« analytique » signifie qu'au voisinage de tout point z_0 , $f(z)$ peut s'exprimer sous la forme d'une somme, éventuellement infinie, de puissances entières de $(z - z_0)$). La remarquable prédiction BPZ, du nom de ses trois auteurs, fit naître un domaine entier de la physique : la théorie conforme des champs, dont les ramifications vont jusqu'à la théorie des cordes.

Du carré au rectangle

Dans le cas de la percolation et de ses probabilités de traverser d'un côté à l'autre, la prédiction BPZ implique que la probabilité limite est identique dans deux pièces différentes à condition que l'on puisse transformer l'une de ces pièces en l'autre par une transformation conforme. C'est ce qui permit au physicien britannique John Cardy de prédire, au début des années 1990, la valeur de la probabilité limite.

La formule qui donne, pour un rectangle, la probabilité limite d'être traversable est une expression compliquée, où interviennent des fonctions dites hypergéométriques. Toutefois, le mathématicien suédois Lennart Carleson (prix Abel en 2006 pour l'ensemble de son œuvre) remarqua qu'elle revêt une forme particulièrement élégante lorsque la pièce a une forme de triangle équilatéral (*voir la figure 4*).

Plus précisément, notons A, B et C les coins de cette pièce. Comme nous avons jusqu'ici considéré des pièces à quatre murs, ne nous arrêtons pas en si bon chemin et plaçons le quatrième coin D de la pièce sur le segment CA (de longueur un), à distance x de A. On a donc une pièce à quatre murs, AB, BC, CD et DA. La formule de Cardy est alors très simple : la probabilité limite que l'on puisse traverser depuis le mur DA jusqu'au mur opposé BC est égale à x . Ce résultat n'est pas surprenant lorsque $x = 1/2$, le raisonnement fait dans le cas du carré pouvant être adapté à ce cas particulier. En revanche, pour des valeurs différentes de x , il est stupéfiant.

J. Cardy s'était appuyé sur de nombreux résultats de théorie conforme des champs qui ne sont pas prouvés. Restait

donc à démontrer rigoureusement sa formule. La dernière pierre de l'édifice fut posée en 2001 par le mathématicien russe Stanislav Smirnov, de l'Université de Genève: il apporta enfin, avec 107 ans de retard, la réponse attendue par l'éditeur de *The American Mathematical Monthly*. Elle porte le nom de formule de Cardy-Smirnov. L'élégante preuve de S. Smirnov, qui tient en quelques pages, utilise de façon fondamentale les transformations conformes. Elle a valu à ce chercheur de nombreux prix, en particulier une médaille Fields en 2010.

Intéressons-nous maintenant à la deuxième question de Maxime. On suppose qu'il se trouve au seuil de sa cuisine, à l'intersection de deux hexagones du bord de son carrelage, un bleu à sa gauche et un jaune à sa droite. Il se donne pour objectif de traverser la pièce en marchant sur les jointures entre hexagones, avec comme unique règle de laisser les hexagones bleus sur sa gauche et les jaunes sur sa droite.

Fractales et aléatoires

Remarquez que Maxime n'a aucun choix lorsqu'il n'est pas sur le bord de la pièce carrelée: à chaque nouveau pas, il découvre devant lui un hexagone, bleu ou jaune, qui détermine la direction (gauche ou droite) où il doit aller. La seule indétermination survient lorsqu'il touche le bord. Dans ce cas, il marche le long du bord dans la direction qui lui permettra d'atteindre le bord opposé sans couper le chemin déjà parcouru. La courbe obtenue en suivant le chemin de Maxime est nommée processus d'exploration (voir la figure 5). Ce processus s'achève dès que Maxime touche le mur opposé. Répondre à la question de Maxime revient alors à estimer la longueur de la courbe.

La courbe d'exploration peut décrire un objet physique tel qu'une interface ou une frontière. Imaginons que le bord du domaine sur la droite de Maxime soit complètement colorié en jaune et représente le sable de la plage, tandis que le bord sur la gauche est colorié en bleu et représente la mer. Le processus d'exploration décrit alors la frontière entre la mer et la plage, la mer contenant des îlots et la plage des flaques d'eau.

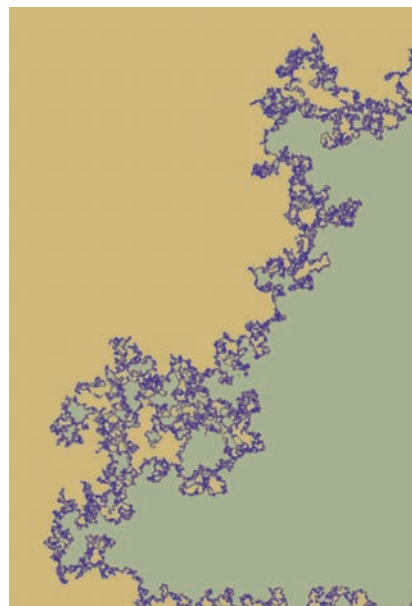
Comme pour la probabilité de traverser une pièce, on peut procéder à l'approximation qui consiste à faire tendre la taille des hexagones vers zéro. Les mathé-

maticiens et les physiciens s'attendent alors à ce que le processus d'exploration prenne l'allure d'une courbe aléatoire. De quel type? En 1999, Oded Schramm, un brillant mathématicien israélien mort en 2008 dans un accident de montagne, introduisit un candidat naturel pour cette courbe. En utilisant des travaux de 1923 de Charles Loewner, mathématicien d'origine tchèque, Schramm a découvert une famille de courbes planes aléatoires construites à partir de transformations conformes et du mouvement brownien à une dimension. Ces courbes continues et aléatoires (voir la figure 6), paramétrées par un nombre réel k , sont notées SLE_k (pour *Schramm-Loewner Evolution*). Ce sont des fractales aléatoires, c'est-à-dire des courbes aléatoires qui gardent le même aspect quelle que soit l'échelle à laquelle on les examine.

Schramm avait conjecturé des liens entre les limites d'échelle de plusieurs modèles bidimensionnels et les courbes SLE_k , notamment SLE_6 pour la percolation décrite ici. En 2001, S. Smirnov, encore lui, parvint à le démontrer pour la percolation.

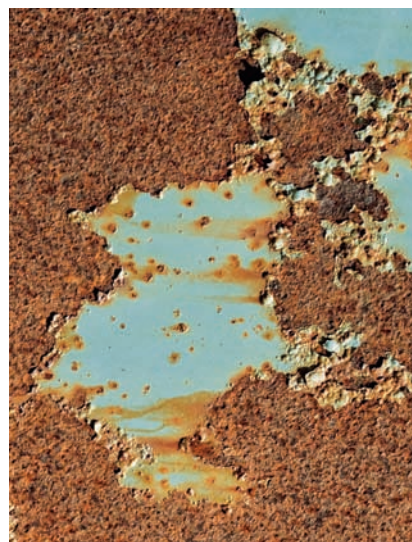
Revenons au nombre de pas nécessaires pour traverser la pièce ou, autrement dit, au nombre de pas de l'exploration discrète. Le résultat de S. Smirnov permet d'approcher le chemin d'exploration par une courbe continue SLE_6 . On ne peut pas calculer la longueur de cette dernière, puisqu'elle est fractale (sa longueur serait infinie!). On peut en revanche calculer sa dimension fractale, liée au nombre d'hexagones de taille L qui sont nécessaires pour la couvrir complètement. Lorsque L tend vers zéro, on montre que ce nombre tend vers l'infini de la même façon que $1/L^{4/3}$, et la dimension fractale de la courbe d'exploration est alors égale à $4/3$. Pour une droite, le nombre d'hexagones augmenterait comme $1/L$, d'où une dimension fractale égale à 1, comme attendu.

On en déduit que le nombre d'hexagones de taille L nécessaires pour couvrir la courbe d'exploration discrète est de l'ordre de $1/L^{4/3}$. Si les hexagones du carrelage sont également de taille L , ce nombre correspond exactement au nombre de pas nécessaires pour traverser la pièce. Imaginons que la taille des hexagones du carrelage de Maxime soit de dix centimètres (0,1 mètre) et que la pièce fasse dix mètres de bout en bout: il faudra environ $(10/0,1)^{4/3} = 317$ petits pas à Maxime pour traverser la cuisine.



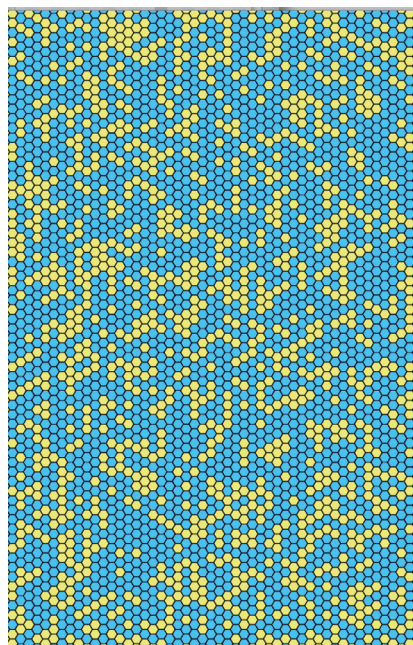
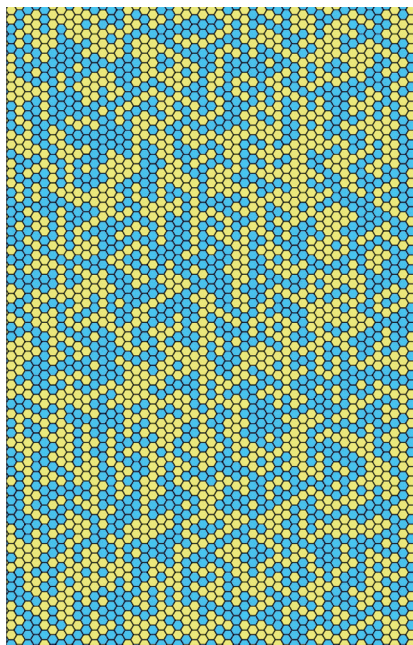
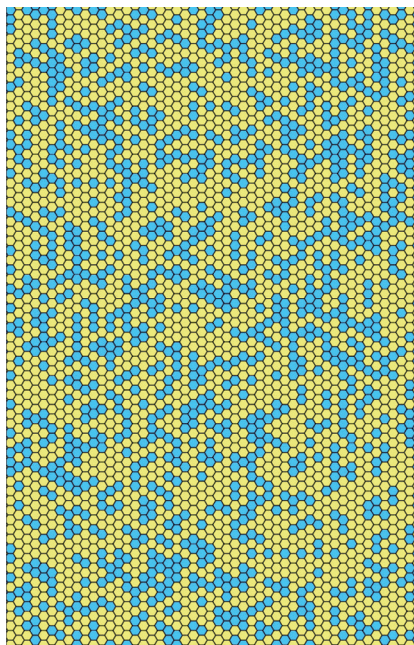
Simulation de Vincent Beffara

6. UNE SIMULATION de la courbe de Schramm notée SLE_6 , qui est reliée à la limite d'échelle du modèle de la percolation, c'est-à-dire la limite obtenue lorsque la taille des cases tend vers zéro. Cette courbe est aléatoire et fractale.



V. GRACIEUX, SIMULON POUR LA SCIENCE

7. LA FRONTIÈRE ENTRE LA RÉGION rouillée et le domaine intact de cette plaque de fer ressemble à une courbe SLE. De fait, certains liens ont été établis entre les phénomènes de corrosion et la percolation.



8. SELON LA VALEUR DE LA PROBABILITÉ de choisir un carreau bleu, l'allure du réseau et ses propriétés seront différentes. Le réseau est illustré ici pour trois valeurs de cette probabilité p : 0,35 (à gauche), 0,5 (au

milieu) et 0,65 (à droite). Pour $p < 1/2$ (et pour un réseau de taille infinie), la probabilité d'avoir un chemin percolant bleu, qui traverse tout le réseau, est nulle. Elle est strictement positive dès que $p > 1/2$.

BIBLIOGRAPHIE

V. Beffara et H. Duminil-Copin, *Lectures on planar percolation with a glimpse of Schramm-Loewner Evolution*, juin 2011 ([www.unige.ch/~duminil/publi/lecture notes percolation.pdf](http://www.unige.ch/~duminil/publi/lecture%20notes%20percolation.pdf)).

W. Werner, *Percolation et modèle d'Ising*, *Cours spécialisés*, vol. 16, Société mathématique de France, 2009.

S. Smirnov, *Towards conformal invariance of 2D lattice models*, *International congress of mathematicians*, vol. II, pp. 1421-1451, European Mathematical Society, Zurich, 2006 (<http://arxiv.org/abs/0708.0032>).

W. Kager et B. Nienhuis, *A guide to stochastic Löwner evolution and its applications*, 2006 (<http://arxiv.org/abs/math-ph/0312056>).

G. Grimmett, *Percolation*, Springer, 1999.

B. Sapoval, *Universalités et fractales*, Flammarion, 1997.

De nombreuses autres questions peuvent être posées sur ce modèle de percolation. Supposons par exemple que l'un de ses enfants ait dupé Maxime en lui fournissant une pièce de monnaie biaisée. Celle-ci tombera sur face avec la probabilité p et donc sur pile avec probabilité $1 - p$, mais p ne vaut plus $1/2$. La situation est alors très différente (voir la figure 8). Si $p < 1/2$, on verra surtout des hexagones jaunes. Au contraire, lorsque $p > 1/2$, les bleus dominent. C'est très différent du cas $p = 1/2$, où les nombres de cases jaunes et bleues sont équilibrés.

Un exemple de système critique

Imaginons que l'on considère des hexagones de plus en plus petits; ou, ce qui revient au même, que les hexagones soient de taille fixée et que l'on considère une cuisine de plus en plus grande. Une question naturelle est la suivante: quelle est la probabilité que l'on puisse rallier le bord de la pièce en partant du centre et en ne marchant que sur des hexagones bleus?

Lorsque $p < 1/2$, nous sommes presque sûrement sur une petite île et il nous sera impossible de nous en échapper: la probabilité de pouvoir rejoindre le bord par un chemin bleu tend vers 0 lorsque la cuisine grandit. En revanche, lorsque

$p > 1/2$, la probabilité de pouvoir nous échapper restera supérieure à une certaine valeur, et ce indépendamment de la taille de la pièce. En fait, si l'on prolonge la pièce à l'infini, un hexagone appartiendra à un chemin infini d'hexagones bleus contigus avec une probabilité positive. Ce phénomène constitue la transition de phase de la percolation et a été prouvé en 1982 par Harry Kesten, de l'Université Cornell.

Les physiciens disent qu'un système est dans un état critique si toute variation infime des paramètres entraîne un bouleversement global du système. La valeur $p = 1/2$ est donc la valeur critique du modèle de la percolation. Si l'on diminue un tout petit peu p , on obtient un continent d'hexagones jaunes qui s'étend d'un bout à l'autre du réseau; si l'on augmente un tout petit peu p , on obtient au contraire une mer d'hexagones bleus.

L'étude d'une transition de phase qui se produit pour une valeur critique d'un paramètre est au cœur de la physique statistique d'aujourd'hui (voir l'encadré page 51). Les modèles de percolation, dont la formulation est simple, voire ludique, rentrent dans ce cadre. À l'instar d'autres modèles de la physique statistique, ils se révèlent d'un grand intérêt pour la physique, la biologie et d'autres sciences, et offrent aux mathématiciens un terrain... de jeu encore loin d'être épuisé. ■

Rendez-vous sur www.pourlascience.fr

■ Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.

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

■ Recherchez et commandez les archives parues depuis 2004 de *Pour la Science* et des *Dossiers Pour la Science*.

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

■ Suivez notre actualité en direct



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



<http://twitter.com/pourlascience>



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



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

Le désordre intrinsèque des protéines

A. Keith Dunker et Richard Kriwacki

Selon les fonctions qu'elles accomplissent dans les cellules, les protéines présentent une conformation rigide ou, au contraire, très flexible. Les biologistes commencent à étudier le rôle des protéines « intrinsèquement désordonnées » dans diverses maladies.

Les quelque 20 000 gènes du patrimoine génétique humain codent des millions de protéines. On ignore leur nombre précis, mais on sait qu'elles sont très nombreuses étant donné le nombre de fonctions qu'elles assurent dans l'organisme. Ainsi, certaines protéines nommées enzymes catalysent les réactions biochimiques ; des protéines soutiennent les parois des cellules ; des protéines sont des moteurs ou des transporteurs intracellulaires ; des protéines agissent dans la communication hormonale ; les anticorps, des agents du système immunitaire, sont aussi des protéines, etc.

Étant donné l'importance des protéines, on pourrait penser que les biologistes n'en ignorent rien. Et pourtant, notre connaissance de cette famille de molécules organiques est incomplète. Les biologistes savaient depuis longtemps que les protéines sont constituées d'acides aminés liés entre eux comme des perles sur un fil. Mais ils étaient convaincus que pour qu'une protéine fonctionne correctement, sa chaîne d'acides aminés devait d'abord se replier d'une façon précise et adopter

une conformation rigide. Aujourd'hui, il est avéré qu'une multitude de protéines effectuent leurs tâches sans jamais se replier complètement et que certaines se replient uniquement quand cela est indispensable. En fait, on estime qu'un tiers ou plus de toutes les protéines humaines sont « intrinsèquement désordonnées », c'est-à-dire qu'elles contiennent au moins certaines parties non repliées, ou désordonnées.

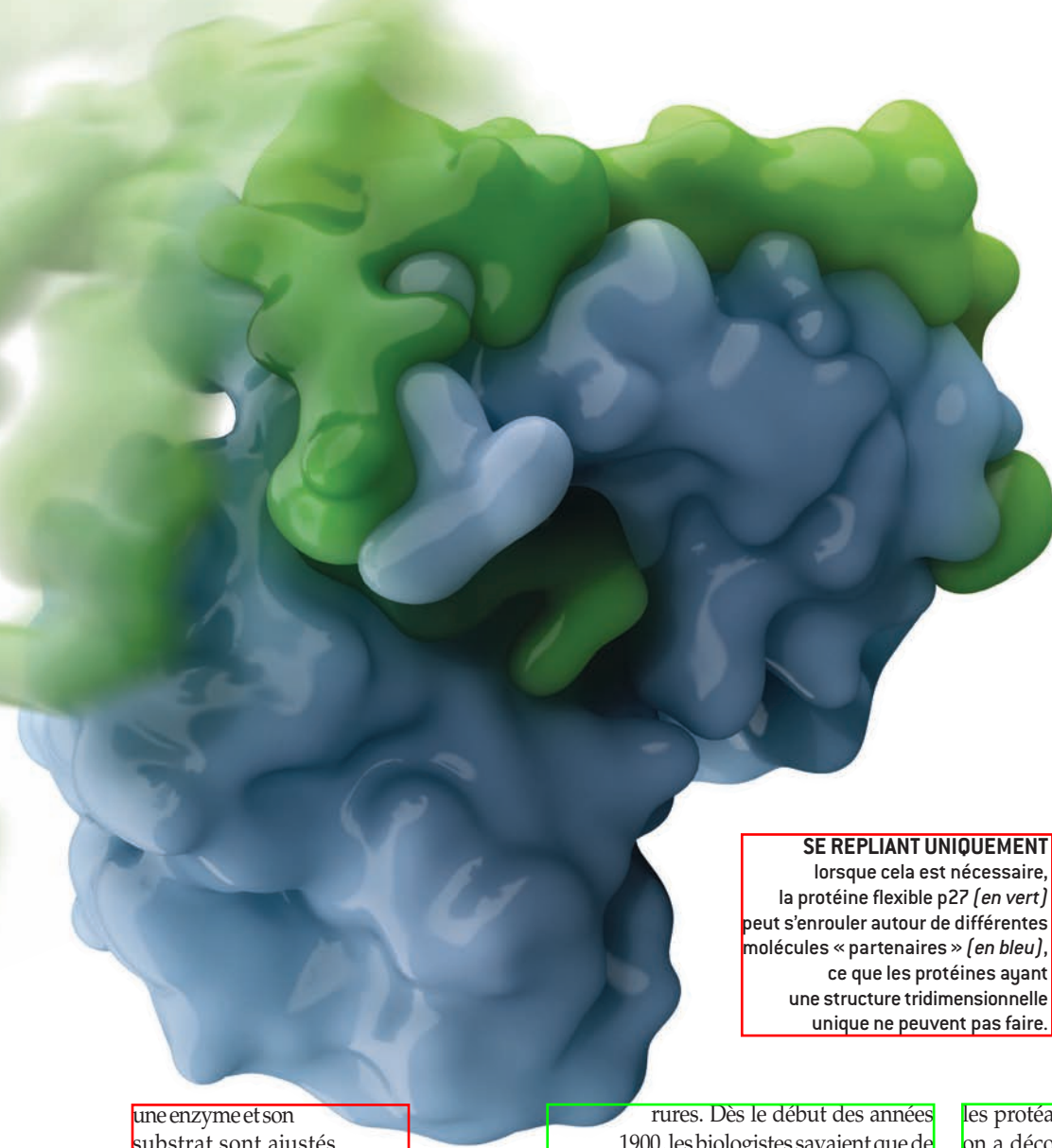
Historiquement, les biologistes ont d'abord caractérisé la structure des enzymes. Elles sont constituées de nombreuses parties mobiles et pourvues de « charnières » permettant aux différents segments de pivoter les uns autour des autres. Ainsi, ces protéines sont souvent décrites comme des combinaisons de parties rigides, telles les différentes parties d'une chaise pliante. Quant aux protéines intrinsèquement désordonnées, elles ressemblent à des spaghettis en cours de cuisson, remuant sans cesse dans une casserole d'eau bouillante.

Il y a 15 ans, cette conception de la structure des protéines aurait semblé totalement insensée. Aujourd'hui, les scientifiques ont compris que cet aspect amorphe et cette

flexibilité ont probablement contribué à l'apparition de la vie sur Terre. La flexibilité joue aussi un rôle crucial dans les cellules, par exemple lors de l'activation des gènes ou de la division cellulaire. Et cette nouvelle approche n'éclaire pas seulement la biologie cellulaire fondamentale, elle ouvre également de nouvelles pistes de recherche pour mieux comprendre et, par conséquent, mieux traiter certaines maladies, tel le cancer.

Des complémentarités parfaites

L'idée selon laquelle une structure tridimensionnelle rigide détermine la fonction d'une protéine est apparue en 1894. Un chimiste de l'Université de Berlin, Emil Fischer, a émis l'hypothèse que les enzymes interagissent avec leurs substrats (les molécules des réactions qu'elles catalysent) en se liant spécifiquement à des formes complémentaires à leur surface. Les enzymes ne reconnaîtraient pas les molécules dont la conformation serait différente, même si la différence est minime. En d'autres termes,



L'ESSENTIEL

✓ Selon le modèle classique, les protéines doivent adopter une forme rigide afin d'accomplir certaines tâches, par exemple fixer des molécules cibles spécifiques.

✓ Pourtant, d'après des travaux récents, au moins un tiers des protéines existant chez l'homme sont partiellement ou complètement non structurées.

✓ Loin d'être pathologique, cette absence de structure rigide est souvent cruciale pour la fonction de la protéine.

SE REPLIANT UNIQUEMENT

lorsque cela est nécessaire, la protéine flexible p27 (en vert) peut s'enrouler autour de différentes molécules « partenaires » (en bleu), ce que les protéines ayant une structure tridimensionnelle unique ne peuvent pas faire.

une enzyme et son substrat sont ajustés comme une clé et une serrure.

À l'époque où Fischer a formulé son modèle, on ignorait la nature des protéines. Durant les décennies qui ont suivi, les biologistes ont découvert que les protéines sont des chaînes d'acides aminés et ont supposé qu'elles devaient se replier en une conformation précise pour assurer correctement leur fonction. En 1931, le biochimiste chinois Hsien Wu confirma cette hypothèse, en montrant que la dénaturation des protéines, c'est-à-dire la perte de leur structure tridimensionnelle naturelle, conduit à une perte complète de la fonction.

En 1958, John Kendrew et ses collègues ont pour la première fois décrit la structure tridimensionnelle d'une protéine, la myoglobine du cachalot, en utilisant la technique de la cristallographie aux rayons X. Depuis, les biochimistes ont déterminé l'architecture de plus de 50 000 types de protéines, généralement en les cristallisant puis en analysant les cristaux aux rayons X.

Toutefois, le monde des protéines n'est pas aussi figé que celui des clés et des ser-

res. Dès le début des années 1900, les biologistes savaient que de nombreux anticorps se lient à de multiples molécules cibles, nommées antigènes – une première observation qui ébranla le modèle « clé-serrure ». Dans les années 1940, le chimiste Linus Pauling découvrit que certains anticorps se replient de différentes façons, le repliement de chaque configuration étant guidé par l'antigène, afin que les deux formes soient ajustées au mieux.

Depuis les années 1940, d'autres observations ont remis en cause le dogme d'une structure tridimensionnelle rigide. Mais on considérait encore les protéines qui ne respectaient pas la règle comme des exceptions, rares et bizarres. L'un d'entre nous (K. Dunker) fut parmi les premiers à collecter de tels exemples et à faire remarquer que, peut-être, les conformations rigides étaient beaucoup plus rares que prévu. En 1953, par exemple, les scientifiques ont remarqué que la caséine, la principale protéine du lait, est essentiellement non structurée. Cette flexibilité facilite probablement sa digestion par les enfants en la rendant plus facilement dégradable par

les protéases. Au début des années 1970, on a découvert qu'une protéine du sang nommée fibrinogène contient une région de grande taille dont la structure n'est pas figée. Cette région, comme d'autres plus petites découvertes plus tard, joue un rôle clé dans la coagulation du sang.

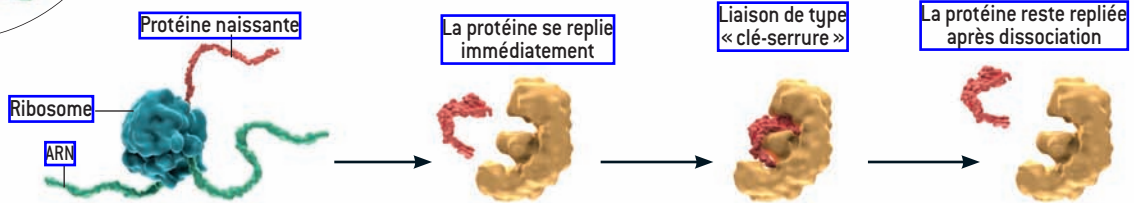
Puis, dans les années 1970, on a mis en évidence un autre exemple : la capsid du virus de la mosaïque du tabac, c'est-à-dire la protéine qui forme l'enveloppe protégeant le matériel génétique du virus ; il s'agit d'un virus à ARN infectant les plantes, dont le tabac. Lorsque la capsid est vide, la protéine présente de grandes régions non structurées flottant librement à l'intérieur de la cavité. Ce manque de compacité permet à de l'ARN, synthétisé pendant la réplication virale dans une cellule infectée, d'entrer dans la capsid. À mesure que l'ARN s'accumule, la protéine s'y lie et sa conformation devient plus rigide.

Les expérimentateurs qui n'arrivaient pas à obtenir des protéines repliées dans leurs expériences ont alors supposé se tromper quelque part. *In vivo*, les chaînes d'acides aminés devaient sûrement trouver une

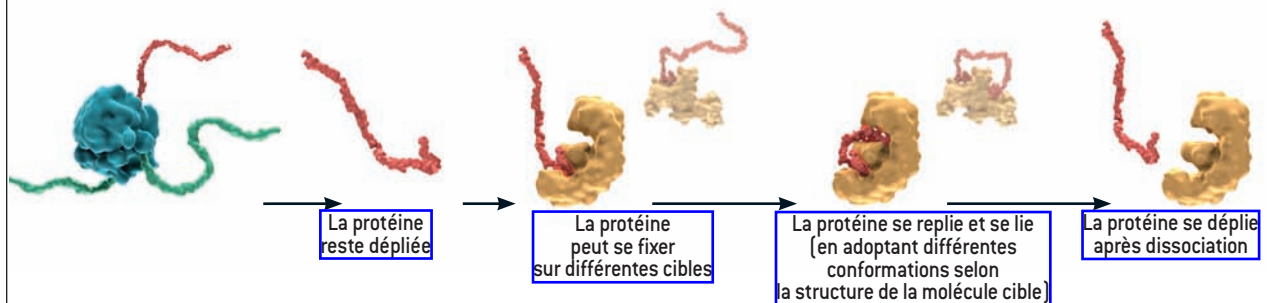
ORDRE CONTRE DÉSORDRE

La machinerie moléculaire des cellules transcrit l'information codée dans des séquences d'ADN – les gènes – en ARN et traduit cet ARN pour former les chaînes d'acides aminés qui composent les protéines. On pensait qu'une protéine doit ensuite se replier selon une configuration unique (*en haut*) pour accomplir correctement sa fonction, par exemple se lier à une molécule spécifique, comme une clé s'adapte à une serrure donnée. Cependant, de nombreuses protéines restent, au moins en partie, dépliées. Cette flexibilité leur permet de se lier à des molécules diverses (*en bas*) ou d'accomplir différentes fonctions.

CONCEPTION CLASSIQUE DE L'ACTIVITÉ DES PROTÉINES



MÉCANISME DÉCOUVERT RÉCEMMENT



conformation repliée « correcte » dans le cytoplasme des cellules. Par exemple, quand des chercheurs plaçaient des solutions contenant des protéines isolées dans des éprouvettes et les examinaient avec un spectromètre à résonance magnétique nucléaire (RMN) – l'outil par excellence pour l'étude des protéines –, ils obtenaient parfois des résultats difficilement interprétables. Ils en ont déduit que ces protéines n'étaient pas parvenues à se replier.

Protéines spaghettis

Mais ces données avaient une histoire bien plus riche à raconter. La spectroscopie par RMN utilise de puissantes impulsions radiofréquences pour déclencher la rotation synchrone des spins (moments magnétiques) des noyaux atomiques d'éléments particuliers, tel l'hydrogène. La réaction des noyaux présente de légers décalages de fréquences que l'on peut relier à la position des atomes dans les acides aminés et à la position de ces acides aminés les uns par rapport aux autres. Ainsi, à partir de ces décalages en fréquences, les biochimistes parviennent à reconstituer la struc-

ture des protéines rigides. Mais si les acides aminés bougent – comme ce serait le cas dans une protéine non repliée –, les décalages en fréquences deviennent difficiles à interpréter.

En 1996, l'un de nous (R. Kriwacki, alors à l'Institut de recherche Scripps) réalisait une spectroscopie par RMN sur une protéine nommée p21, impliquée dans le contrôle de la division cellulaire, lorsqu'il remarqua quelque chose de surprenant. Selon ses données de RMN, p21 était presque entièrement déstructurée. Les acides aminés tournaient librement autour des liaisons chimiques qui les maintenaient ensemble, ne restant jamais dans une conformation donnée plus d'une fraction de seconde. Et pourtant – et c'est cela qui était surprenant –, p21 continuait à accomplir sa fonction de régulation. Cela constituait la première démonstration que l'absence de structure ne faisait pas perdre sa fonction à une protéine.

La spectroscopie par RMN reste la principale technique pour déterminer si une protéine est repliée ou désordonnée et, avec d'autres techniques, elle a permis de confirmer que de nombreuses protéi-

nes sont intrinsèquement désordonnées (voir l'encadré page 59). Ces molécules se transforment constamment sous l'action du mouvement brownien et de leur propre agitation thermique, et pourtant elles restent parfaitement fonctionnelles.

Cette nouvelle conception des protéines est bien illustrée par la protéine p27, qui est présente chez la plupart des vertébrés. Comme p21, p27 est l'une des principales protéines qui régulent la division cellulaire. La RMN montre que p27 est très flexible, avec des parties qui se plient et se déplient rapidement pour former des structures, soit en tire-bouchon (hélice alpha), soit en feuillets (feuillets bêta). La plupart des cellules cancéreuses chez l'homme ont des quantités réduites de p27, et plus ce déficit est important, moins le pronostic est bon.

La protéine p27 agit comme un frein sur la division cellulaire en se liant à au moins six types différents de kinases (des enzymes) et en inhibant leur activité. Les kinases sont les principaux régulateurs de la réplication de l'ADN et de la division cellulaire. Elles transportent le phosphate (PO_4) et le fixent sur les autres protéines (on dit qu'elles les « phosphorylent »), ce qui déclen-

che une cascade d'événements. En exécutant sa tâche, la molécule p27 s'enroule autour d'une kinase, comme une corde, recouvrant une partie de sa surface, y compris ses sites actifs. Ce blocage empêche la phosphorylation et stoppe ainsi la division cellulaire. Grâce à sa flexibilité, p27 peut s'enrouler autour de différents types d'enzymes et les inhiber.

Comment la fonction est-elle conciliable avec le désordre ?

La protéine p27, qui est presque complètement déstructurée, se trouve près de l'extrémité « désordonnée » d'une échelle qui va du désordre total (protéine totalement déstructurée) à l'ordre total (protéine totalement rigide). Les kinases se trouvent près

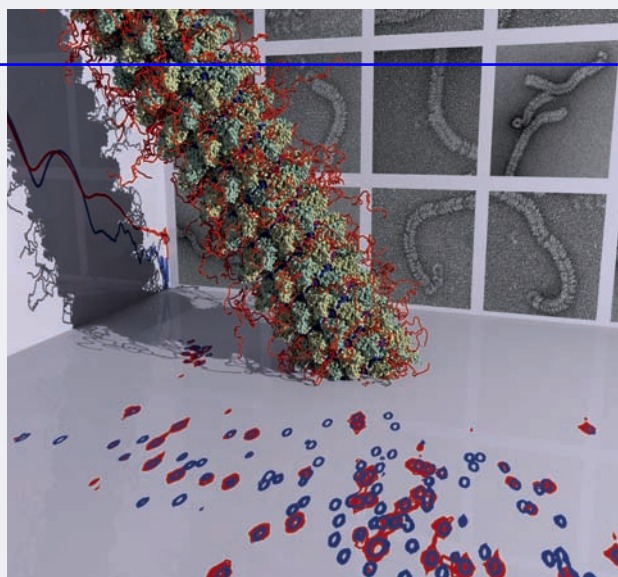
de l'extrémité opposée de cette échelle. De nombreuses autres protéines se situent entre ces deux extrémités, portant des régions structurées et des régions non structurées.

La calcineurine, qui participe aux réactions immunitaires (et qui est la cible des médicaments antirejet), est l'inverse d'une kinase : elle retire les groupes phosphates des protéines phosphorylées. Elle porte une région structurée qui est le site actif de l'enzyme et fonctionne sur le mode classique clé-serrure pour enlever les phosphates portés par d'autres protéines. Mais elle présente aussi une région non structurée qui se lie au site actif de cette enzyme et l'inactive quand il n'est pas nécessaire de retirer un groupe phosphate. Ainsi, la calcineurine représente deux protéines en une seule : la région structurée effectue la catalyse et la région non structurée régule cette fonction catalytique.

Modélisation des protéines intrinsèquement désordonnées

Les protéines intrinsèquement désordonnées sont maintenant considérées comme des actrices cruciales dans le fonctionnement des organismes. De par leur importante flexibilité, leur comportement ne peut être expliqué par le modèle clé-serrure, qui suppose que deux partenaires biologiques ne peuvent interagir que s'ils présentent une complémentarité de forme. De surcroît, il est extrêmement difficile de caractériser en détail ces protéines intrinsèquement désordonnées, car leur conformation change sans cesse, aucune ne durant plus d'une fraction de seconde. La résonance magnétique nucléaire (RMN) permet d'obtenir des informations sur les conformations adoptées par ces protéines au cours du temps. Mais si cette technique demeure la plus adaptée pour étudier ces objets complexes, la combinaison avec d'autres approches permet d'améliorer notre compréhension de ces systèmes.

De nombreuses équipes de recherche françaises y travaillent, et la récente étude de la nucléoprotéine du virus de la rougeole est un exemple des travaux menés sur les protéines intrinsèquement désordonnées. Cette étude a été conduite par les équipes grenobloises de Martin Blackledge, de l'Institut de biologie



La figure montre une reconstruction de la capsid du virus de la rougeole à partir des données de microscopie électronique (*au fond*), de diffusion aux petits angles (*à gauche*) et résonance magnétique nucléaire à très haut champ (*au premier plan*). Les parties rouges de la capsid représentent le domaine désordonné qui contrôle le déclenchement de la réplication du virus.

structurale, et de Rob Ruigrok, de l'Unité Interaction virus-cellule hôte, et l'équipe de Sonia Longhi du Laboratoire marseillais Architecture et fonction des macromolécules biologiques. En utilisant une combinaison de trois techniques complémentaires, la RMN, la microscopie électronique et la diffusion des rayons X aux

tronique a permis de déterminer la forme globale de la partie structurée de la capsid : un enroulement hélicoïdal supramoléculaire formé d'un ensemble de protéines enrobant un brin d'ARN viral. Mais comme cette technique ne permet pas de « voir » les parties non structurées du système, la diffusion des rayons X aux petits angles a été utilisée pour localiser ces parties flexibles à l'extérieur de la capsid. Enfin, la RMN a permis d'étudier en détail le comportement moléculaire de cette partie désordonnée avec une résolution atomique.

Ces différents résultats suggèrent que la partie désordonnée de la nucléoprotéine joue son rôle dans la transcription et la réplication du virus de la rougeole en sortant de la capsid ; elle exploite sa flexibilité pour explorer l'espace environnant afin de pouvoir interagir avec les machines moléculaires qui permettront la lecture du génome du virus. Ces études combinant différentes techniques et expertises permettent ainsi de préciser le rôle de la flexibilité des protéines intrinsèquement désordonnées, et cela dans leur environnement biologique.

Martin Blackledge,
Institut de biologie structurale,
CEA-CNRS-UJF, Grenoble

LES TRAVAILLEURS POLYVALENTS DE LA CELLULE

De par leurs différents rôles – enzymes, composants structuraux, machines moléculaires, etc. –, les protéines participent à quasiment toutes les fonctions cellulaires. On

a représenté ici trois exemples de protéines dont la structure n'est pas rigide, ce qui est nécessaire pour qu'elles remplissent correctement leur fonction.

Transporteur monorail

Une machine moléculaire constituée de deux copies de kinésine, une protéine, « avance » le long de microtubules pour entraîner une vésicule ou un autre « chargement » d'un endroit de la cellule à un autre. Chaque étape est déclenchée par une molécule d'ATP, l'énergie cellulaire, qui réagit avec le « pied » avant et force une partie charnière non structurée de la protéine à se replier sur ce pied. Cette partie charnière, dans le même temps, tire le pied arrière, le forçant à progresser vers l'avant, où il se rattache au microtubule.

Chargement

Kinésine

Région non structurée

ATP

Microtubule

Gardien anticancer

Quand l'ADN d'une cellule est endommagé par un rayonnement ou une autre cause, un assemblage de quatre copies de p53 s'accroche à l'ADN en des sites spécifiques pour déclencher la production d'enzymes de réparation de l'ADN. Les parties non structurées de p53 permettent au complexe protéique de s'enrouler autour de la double hélice. En plus de l'ADN, cette protéine peut interagir avec l'ARN et plus de 100 autres types de protéines.

Pore nucléaire

Protéines dépliées

ADN

p53

Région non structurée de p53

Gardien du noyau

Enchâssé dans la membrane nucléaire, le pore nucléaire est un complexe constitué d'environ 30 protéines différentes assemblées selon une symétrie octogonale parfaite ; il régule l'entrée et la sortie de certaines molécules. L'ouverture est remplie d'un « gel » de protéines complètement dépliées. Les petites molécules, telles que les molécules d'eau, traversent ce gel sans entrave, tandis que les grosses molécules nécessitent un système de transport actif.

Les exemples évoqués jusqu'à présent sont des protéines qui se replient – soit sur elles-mêmes, soit autour d'autres protéines – lorsqu'elles accomplissent leur fonction (voir l'encadré page 60). Mais le désordre est souvent une partie intégrante du fonctionnement d'une protéine. Parfois, une région non structurée agit comme un minuteur contrôlant le moment auquel deux sites de liaison se rencontrent : si la région non structurée est longue, les deux sites de liaison passent plus de temps à se chercher que lorsque la région non structurée est courte, car la probabilité de « rencontre » des deux sites est inférieure. Dans certains cas, le fait d'être déstructurée permet à une protéine particulière de se faufiler à travers la membrane cellulaire. De telles protéines non structurées apparaissent dans les axones des neurones, où elles forment des structures protégeant l'axone en occupant le volume aux alentours et en empêchant les enzymes de destruction d'approcher.

On a même constaté que certaines protéines restent non structurées après leur liaison. C'est le cas de la protéine Sic1 de la levure (un organisme unicellulaire à noyau, ou eucaryote unicellulaire) ; elle est attachée à son partenaire grâce à plusieurs petits segments qui se fixent et se détachent en continu sur un site de liaison unique, tandis que le reste de Sic1 reste désordonné.

Un désordre généralisé

Le désordre existe aussi parmi les protéines des organismes plus simples et même des virus. Certains virus nommés phages (ou bactériophages), qui infectent les bactéries, se fixent sur la membrane d'une bactérie *via* des protéines reliées à la capsid du phage par l'intermédiaire de liens flexibles. La protéine d'attachement peut se mouvoir plus facilement dans l'espace que le phage entier et le réorienter lors du processus d'arrimage, facilitant ainsi sa pénétration dans la bactérie.

Jusqu'à présent, les chercheurs du monde entier ont identifié la fonction d'environ 600 protéines partiellement ou totalement non structurées. Mais nous pensons qu'il en existe beaucoup plus. Après tout, les scientifiques n'ont déterminé la structure que d'une petite fraction des millions de protéines qui existent dans l'organisme humain. De nouvelles études bio-informatiques menées par K. Dunker et ses collègues tendent à le confirmer.

L'approche bio-informatique est fondée sur des études théoriques antérieures de protéines, qui suggéraient qu'une chaîne d'acides aminés tout juste formée se repliait différemment selon sa composition. En particulier, les acides aminés qui sont volumineux et hydrophobes – sans affinité pour les molécules d'eau qui entourent naturellement les protéines – ont tendance à se positionner au cœur de la protéine. Au contraire, ceux qui se positionnent à la surface d'une protéine repliée sont généralement petits et hydrophiles – et ont tendance à s'attacher aux molécules d'eau environnantes.

LES BIOLOGISTES ONT DÉCOUVERT

que jusqu'à 35 pour cent des protéines humaines auraient de longues régions non structurées.

K. Dunker a voulu comparer les séquences d'acides aminés de protéines intrinsèquement désordonnées avec celles de protéines rigides. En utilisant divers algorithmes, son équipe a découvert en 1997 que les protéines intrinsèquement désordonnées tendent à être plus riches en acides aminés hydrophiles que les protéines rigides. Ainsi, la proportion d'acides aminés hydrophiles et hydrophobes permettrait de prévoir si une protéine se replie partiellement ou pas du tout.

Pour étudier les conséquences de ces découvertes, l'équipe de K. Dunker a comparé, en 2000, divers génomes du monde vivant. Les bio-informaticiens ont examiné les génomes de plusieurs organismes en recherchant des séquences d'ADN codant de longues chaînes d'acides aminés hydrophiles. Les protéines correspondantes seraient les meilleures candidates pour être au moins partiellement non structurées. Dans les organismes les plus simples, les bactéries et les archées (ou archéobactéries), on pense qu'il y a peu de protéines intrinsèquement désordonnées. Mais chez les eucaryotes (les organismes plus complexes, qui ont des cellules pourvues d'un noyau), les protéines déstructurées semblent être beaucoup plus répandues.

Ces résultats ont été généralisés en 2004 par l'équipe de David Jones, de l'*University College* de Londres, qui a effectué des comparaisons similaires en incluant des données humaines. Les biologistes ont découvert que jusqu'à 35 pour cent de toutes les protéines humaines portent de

longues régions non structurées. Ainsi, environ un tiers des protéines humaines présenteraient de grandes régions pour lesquelles le concept clé-serrure est inadapté.

On ignore la raison d'un tel résultat, mais il est possible que les protéines ayant des caractéristiques structurales de type clé-serrure aient surtout des fonctions enzymatiques et de régulation. Les organismes procaryotes (les bactéries) contiennent tous leurs constituants dans un seul compartiment. Au contraire, les organismes eucaryotes sont dotés de multiples compartiments intracellulaires, tels le noyau, l'appareil de Golgi, les mitochondries, etc. Or, il faut que ces différents organites communiquent et ils nécessitent une régulation importante. Les organismes pluricellulaires doivent également disposer de signaux pour coordonner les actions des différentes cellules et des tissus. La protéine p27 peut, grâce à sa flexibilité, transporter des messages chimiques le long des voies de signalisation d'une cellule : ces messages sont codés dans sa conformation, dans ses modifications chimiques telle la phosphorylation, et dans les molécules partenaires auxquelles elle se lie (qu'elle inhibe ou régule).

Le secret le mieux gardé de l'évolution

La faible concentration de protéines intrinsèquement désordonnées chez les bactéries signifie peut-être que ces protéines sont apparues tardivement au cours de l'évolution. Toutefois, cela ne semble pas être le cas. D'une part, de nombreux systèmes de signalisation bactériens utilisent plutôt des protéines déstructurées que des protéines structurées. D'autre part, dans les machines moléculaires anciennes (du point de vue évolutif), qui sont constituées d'assemblages d'ARN et de protéines, presque toutes ces protéines sont partiellement ou entièrement déstructurées quand elles ne sont pas liées à leurs ARN « partenaires ». Ces anciens complexes hybrides (complexes ribonucléoprotéiques) comprennent le spliceosome et le ribosome. Les recherches sur l'origine de la vie

LES AUTEURS



Keith DUNKER est biophysicien à l'École de médecine de l'Université de l'Indiana, aux États-Unis, où il dirige le Centre de biologie computationnelle et de bio-informatique. Richard KRIWACKI est biologiste à l'Hôpital pour enfants de St Jude à Memphis.

BIBLIOGRAPHIE

Jensen *et al.*, Intrinsic disorder in measles virus nucleocapsids, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 108, pp. 9839-9844, 2011.

Peter Tompa *et al.*, Structural disorder throws new light on moonlighting, *Trends in Biochemical Sciences*, vol. 30, n° 9, pp. 484-489, 2005.

H. Jane Dyson et Peter E. Wright, Intrinsically unstructured proteins and their functions, *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, vol. 6, pp. 197-208, 2005.

A. Keith Dunker *et al.*, Identification and functions of usefully disordered proteins, *Advances in Protein Chemistry*, vol. 62, pp. 25-49, 2002.

Richard W. Kriwacki *et al.*, Structural studies of p21Waf1/Cip1/Sdi1 in the free and Cdk2-Bound state : conformational disorder mediates binding diversity, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 93, n° 21, pp. 11504-11509, 1996.

Base de données de protéines non structurées connues : www.disprot.org
Base de données de protéines structurées : www.rcsb.org/pdb

plaident aussi en faveur de l'ancienneté des protéines déstructurées. Selon l'une des principales hypothèses, les premiers organismes vivants étaient fondés sur l'ARN et non sur l'ADN. Cet ARN agissait à la fois comme molécule catalytique et comme réservoir de l'information génétique – les rôles qui, dans les cellules actuelles, sont respectivement joués par les protéines et l'ADN.

Dans cette théorie d'un « monde à ARN », une difficulté majeure tient au fait que l'ARN se replie difficilement dans sa forme active et reste souvent figé dans des conformations inactives. Dans les cellules actuelles, des protéines dites chaperonnes assurent un repliement correct de l'ARN et d'autres le stabilisent dans sa conformation active. Ces deux types de protéines n'ont pas de structure stable avant de se lier à l'ARN. Leur apparition aurait ainsi permis de résoudre l'épineux problème du repliement de l'ARN.

Une épée à double tranchant

L'analyse de l'origine du code génétique conforte encore l'hypothèse de l'apparition précoce des protéines non structurées. Le code génétique est l'ensemble des règles utilisées par les cellules pour transcrire l'information codée dans les acides nucléiques (ARN et ADN) en une séquence d'acides aminés. Certains acides aminés auraient été codés très tôt au cours de l'évolution, alors que d'autres seraient apparus plus tard.

Les acides aminés hydrophobes, volumineux, qui poussent une protéine à se replier, seraient apparus tardivement, et donc les protéines constituées des premiers acides aminés devaient très probablement rester dépliées quand elles étaient seules. Si ces hypothèses sur l'évolution du code génétique sont correctes, alors les premières protéines apparues sur Terre se repliaient mal ou pas du tout. Les acides aminés apparus ultérieurement ont manifestement permis aux protéines de se structurer. Elles ont alors acquis des sites enzymatiques actifs de type clé-serrure et, dès lors, ont assuré les fonctions remplies par les ARN dans les cellules pendant des millions d'années.

Étant donné le rôle central que jouent les protéines en biologie, il n'est pas surprenant que beaucoup d'entre elles soient impliquées dans les maladies. Cette

nouvelle conception du désordre intrinsèque des protéines modifiera certainement la façon dont nous comprenons et traitons les maladies. Tout d'abord, dans certains cas, le manque de structure d'une protéine peut être nuisible : quand une cellule produit en excès des protéines non structurées, ces dernières forment des agrégats. Dans le cerveau, ces plaques sont incriminées dans des maladies neurodégénératives telles la maladie d'Alzheimer, la maladie de Parkinson et la chorée de Huntington.

Plus généralement, il semble que la production des protéines non structurées doive être rigoureusement contrôlée pour assurer le fonctionnement normal de l'organisme. Une étude à grande échelle sur la levure, la souris et l'homme, dirigée par Madan Babu, du Laboratoire de biologie moléculaire du Centre de recherche médicale de Cambridge, en Grande-Bretagne, a montré, en 2008, que les cellules régulent les protéines désordonnées plus étroitement que les protéines rigides.

Sachant que les protéines intrinsèquement désordonnées peuvent être impliquées dans certaines maladies, on imagine de nouvelles pistes thérapeutiques. Les protéines qui interagissent avec des protéines non structurées offrent souvent à leurs partenaires des points d'ancrage où les chercheurs pourraient fixer des molécules qui, par exemple, bloqueraient des interactions délétères ou, au contraire, avantageuses. Ainsi, en empêchant un gène suppresseur de tumeur d'interagir avec l'un de ses régulateurs, des biologistes ont obtenu certains succès dans la lutte contre le cancer chez des animaux de laboratoire. Des essais cliniques vont commencer chez l'homme pour tester ces molécules. R. Kriwacki et ses collègues mettent au point une stratégie similaire pour traiter le rétinoblastome, un cancer de l'œil qui touche en particulier les enfants. Les premiers tests chez l'animal ont donné des résultats encourageants.

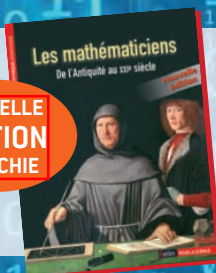
Le modèle clé-serrure qui a si longtemps expliqué la fonction des protéines a perdu sa toute-puissance. Aujourd'hui, on sait que certaines fonctions biologiques sont remplies par des protéines rigides, et d'autres par des protéines dont la structure fluctue. Mais plus de 100 ans après l'énonciation du dogme voulant que les protéines aient une structure rigide, l'histoire des liens entre la structure des protéines et leurs fonctions reste à écrire. ■

La librairie SCIENCE

■ POUR LA

Le savoir scientifique au fil des pages...

NOUVELLE
ÉDITION
ENRICHIE



Les mathématiciens ■ Collectif

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

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



À contre-idées ■ Didier Nordon

Trouver du comique dans une idée sérieuse (et inversement), du local dans une idée générale (et inversement), de l'absurde dans une idée sensée (et inversement)... Au fil de ses billets d'humeur, Didier Nordon s'ingénie à bousculer les idées reçues.

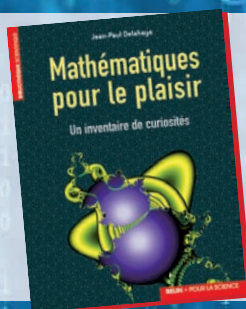
224 pages • 19 euros • ISBN 978-2-8424-5110-3



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

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

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



Mathématiques pour le plaisir ■ Jean-Paul Delahaye

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

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



La physique buissonnière ■ Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

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

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

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

ABYSSES : un empire méconnu

Craig McClain

Loin d'être une étendue désertique, les grands fonds marins constituent un écosystème complexe : la faune très variée qui les peuple est directement tributaire du phytoplancton vivant en surface.

La Terre : un globe d'environ 510 millions de kilomètres carrés de surface, dont près de 64 pour cent sont situés sous plus de 200 mètres d'eau. À ces profondeurs, l'absence de lumière empêche la photosynthèse. Or ce processus biologique de conversion de l'énergie solaire est à la base de la plupart des relations trophiques, c'est-à-dire des échanges d'énergie et de matière entre les êtres vivants d'un milieu donné : sans photosynthèse, pas de nourriture ! Ainsi, sur notre planète, les habitats pauvres en nourriture prédominent.

Il y a deux siècles, les scientifiques en avaient déduit l'absence de toute forme de vie dans les profondeurs océaniques. Aujourd'hui, après des décennies d'explorations et d'avancées techniques, on s'aperçoit que l'écosystème des grands fonds est bien plus complexe qu'on ne l'imaginait : les abysses sont peuplés d'une grande diversité d'organismes vivants. La plupart d'entre eux ne subsistent que grâce à une seule source de nourriture, la « neige marine », particules constituées des excréments et des restes des organismes de surface et qui saupoudrent continuellement les fonds marins.

Les énigmes foisonnent en ces lieux. On estime que, chaque année, environ 16 giga-

tonnes de carbone organique produites par le phytoplancton *via* la photosynthèse coulent vers les fonds océaniques. Or seuls trois pour cent de ce carbone atteignent les fonds. Comment si peu de nourriture suffit-elle à alimenter toutes les formes de vie de cet habitat ? Comment une telle diversité a-t-elle pu persister ? Quelles stratégies adaptatives ont été développées par les différents organismes ? Pouvons-nous tirer de ces données un enseignement sur les adaptations évolutives du passé ?

L'ESSENTIEL

✓ Contrairement à ce que l'on pensait au XIX^e siècle, les grands fonds marins sont peuplés.

✓ La principale source de nourriture des abysses est la « neige marine », particules riches en carbone organique produites à partir de la photosynthèse du phytoplancton vivant à la surface des océans.

✓ Malgré la rareté de la nourriture, les profondeurs abritent une grande biodiversité.

✓ Pression de sélection, stratégies adaptatives et microhabitats sont les principales causes invoquées pour expliquer cette biodiversité complexe et méconnue.

De la vie dans les abysses ?

Au milieu des années 1800, les naturalistes pensaient que la vie marine ne pouvait exister à des profondeurs excédant 550 mètres. Cette hypothèse, dite « azoïque », formulée par le naturaliste britannique Edward Forbes, paraissait logique au regard des connaissances de l'époque : aucune espèce ne semblait en mesure de survivre sous les conditions extrêmes – pression élevée, obscurité et basses températures – caractérisant les profondeurs océaniques. Aussi l'hypothèse azoïque s'était-elle répandue rapidement dans la communauté scientifique.

Elle se révéla erronée, mais en la formulant, Forbes avait mis en exergue un aspect primordial en biologie marine : le lien étroit entre source de nourriture et vie sous-marine. Sans lumière et sans vie végétale, les profondeurs lui paraissaient inaptes à héberger une quelconque forme de vie. Il n'avait pas envisagé la possibilité que des matériaux organiques prove-

nant de la surface fournissent suffisamment de carbone pour que divers organismes se développent dans les fonds marins.

À la surface de l'océan, le phytoplancton transforme par photosynthèse le dioxyde de carbone de l'atmosphère en carbone organique, qu'il fixe dans ses tissus. D'autres organismes consomment ce phytoplancton et sont à leur tour consommés. Ce processus d'alimentation continu produit des excréments. Au bout d'un certain temps, les organismes meurent. Excréments, organismes morts et matériaux inorganiques alimentent ainsi continuellement les fonds marins, sous la forme de petits agrégats. Les polymères produits en tant que déchets par les bactéries et le phytoplancton assurent la cohésion de ces agrégats. Agglomérés, ceux-ci constituent la «neige marine», la principale source de nourriture dans les profondeurs océaniques.

Une faune nourrie de neige marine

La neige marine ne tombe pas uniformément sur le fond de la mer, tant dans l'espace que dans le temps. Dans les régions côtières, le phytoplancton produit plus de matière organique, car il bénéficie de la montée d'eaux riches en nutriments vers la surface. En général, plus la production est importante en surface, plus il y a de neige marine en profondeur. En outre, à mesure que l'on s'éloigne de la côte et que la profondeur croît, la neige marine doit traverser une plus grande quantité d'eau pour atteindre le fond de la mer, ce qui augmente les chances que toutes sortes d'organismes – des bactéries aux poissons osseux – la consomment en totalité ou en partie sur son trajet.

Forbes ne pouvait connaître la neige marine ; celle-ci ne fut décrite que bien après sa mort. Deux autres éléments, qui constituent aujourd'hui le pivot de la théorie moderne des écosystèmes des grandes profondeurs, lui avaient aussi échappé. Le premier est que, sur le fond de la mer, la biomasse, la masse totale de tous les êtres vivants, est reliée à la quantité de

1. HABITANTES DES PROFONDEURS, les femelles des poissons de la famille des *Ceratiidae*, les baudroies, attirent leurs proies avec un leurre, de la lumière bleue émise par des bactéries symbiotiques. C'est là une des nombreuses stratégies adaptatives des animaux des abysses.

© Visuels Unlimited/Corbis - Pour la Science





2. QUELQUES-UNES des nombreuses espèces d'organismes macrofauniques extraites d'une carotte de seulement sept centimètres de diamètre et dix centimètres d'épaisseur prélevée dans les grands fonds. Une surface d'un demi-mètre carré environ peut contenir plus de 300 espèces.

carbone à la surface de l'océan et à la quantité de neige marine qui s'ensuit. En 2007, avec mes collègues, nous avons ainsi observé que les augmentations et les réductions de la biomasse sur le fond de l'Atlantique Nord sont étroitement liés aux variations de la production de plancton à la surface de l'océan. Par conséquent, la biomasse la plus élevée se retrouve près des régions côtières et à de faibles profondeurs – inférieures à quelques centaines de mètres. Forbes a joué de malchance sur ce point : il a choisi comme terrain d'étude les fonds de l'Est de la Méditerranée, une zone qui, on le sait aujourd'hui, produit très peu de carbone organique en surface.

Le second point est que les bateaux dragueurs utilisés pour échantillonner les fonds marins étaient alors inefficaces pour capturer de petits organismes et laissaient échapper une part importante de la faune très diverse des mers profondes. Quelques décennies seulement après l'affirmation de Forbes, ces petits organismes étaient observés. Selon le naturaliste britannique Henry Nottidge Mosely, certains animaux semblaient même avoir rapetissé dans les conditions des grandes profondeurs. Et, en 1975, Hjalmar Thiel, de l'Université de Hambourg, a montré qu'avec l'augmentation de la profondeur, les petits organismes deviennent prédominants.

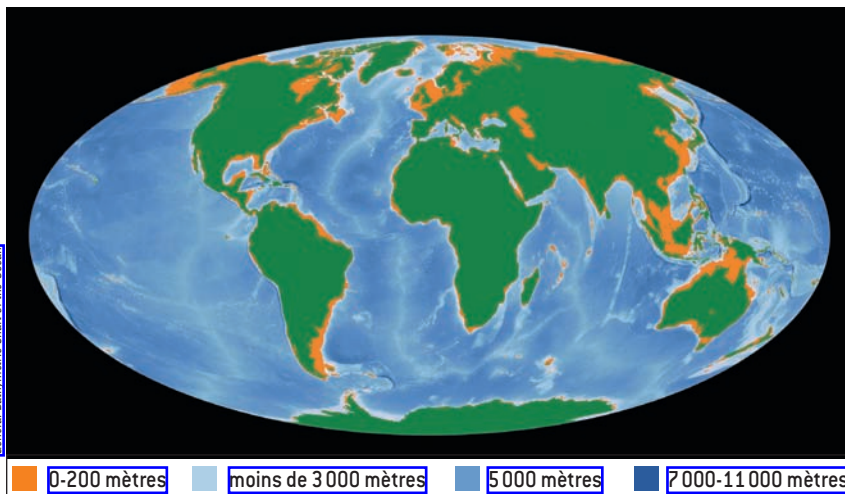
Les grands fonds, dont la neige marine constitue la seule source de nourriture, privilégieraient-ils les petits organismes ? La situation, nous allons le voir, n'est pas aussi simple. Les formes de vie dans les

grandes profondeurs peuvent être classées en quatre catégories en fonction de leur taille : la mégafaune, c'est-à-dire les organismes tels les poissons, les crabes, les homards, les étoiles de mer, les oursins, les concombres de mer (ou holothuries), les éponges et les coraux, qui sont suffisamment grands pour être photographiés ou capturés dans des chaluts ; la macrofaune, comprenant les polychètes (des vers annélides), de petits crustacés et de petits mollusques, qui peuvent être capturés avec des filets à maille fine, mais sont rarement observés à l'œil nu ; la méiofaune, incluant les foraminifères, les copépodes et les nématodes, qui sont retenus uniquement par des mailles de très petite taille ; et, enfin, les bactéries, les plus petits de tous ces organismes.

Des être miniaturisés... ou géants

H. Thiel a observé que la mégafaune et la macrofaune diminuent plus rapidement avec la profondeur que la méiofaune ou les bactéries. De fait, avec l'augmentation de la profondeur, la méiofaune et les bactéries dominent de plus en plus. Ainsi, à des profondeurs supérieures à quatre kilomètres, dans les vastes plaines abyssales où la nourriture est très limitée, il y a un net basculement vers des tailles minuscules. En voici un exemple frappant : mon directeur de thèse Michael Rex, de l'Université du Massachusetts à Boston, et moi-même avons calculé que notre collection entière de plus de 20 000 gastéropodes de mer profonde pêchés dans l'Ouest de l'Atlantique Nord pourrait entrer à l'intérieur d'un unique *Busyon carica*, une conque de la taille du poing.

Cela ne signifie pas pour autant que tous les animaux des profondeurs sont « miniaturisés ». S'il y a bien une diminution globale de la taille des invertébrés vivant à grande profondeur, certains groupes d'animaux (taxons) présentent au contraire des tailles supérieures à mesure que l'on s'enfonce, approchant le gigantisme. Par exemple, si les gastéropodes des eaux profondes sont plus petits que leurs homologues de surface, leur taille augmente avec la profondeur. Mais le schéma inverse a aussi été observé chez d'autres types de gastéropodes, dont la taille diminue avec la profondeur. Le même phénomène est apparu chez d'autres taxons, tels certains crustacés. Quels processus bio-



3. PRÈS DE 64 POUR CENT DE LA SURFACE TERRESTRE se trouvent sous plus de 200 mètres d'eau. Le manque de lumière à ces profondeurs empêche la photosynthèse et la prolifération de végétaux, qui constituent la base des tissus nourriciers sur terre et en eaux peu profondes.

logiques ont engendré ces tendances opposées dans l'évolution de la taille ?

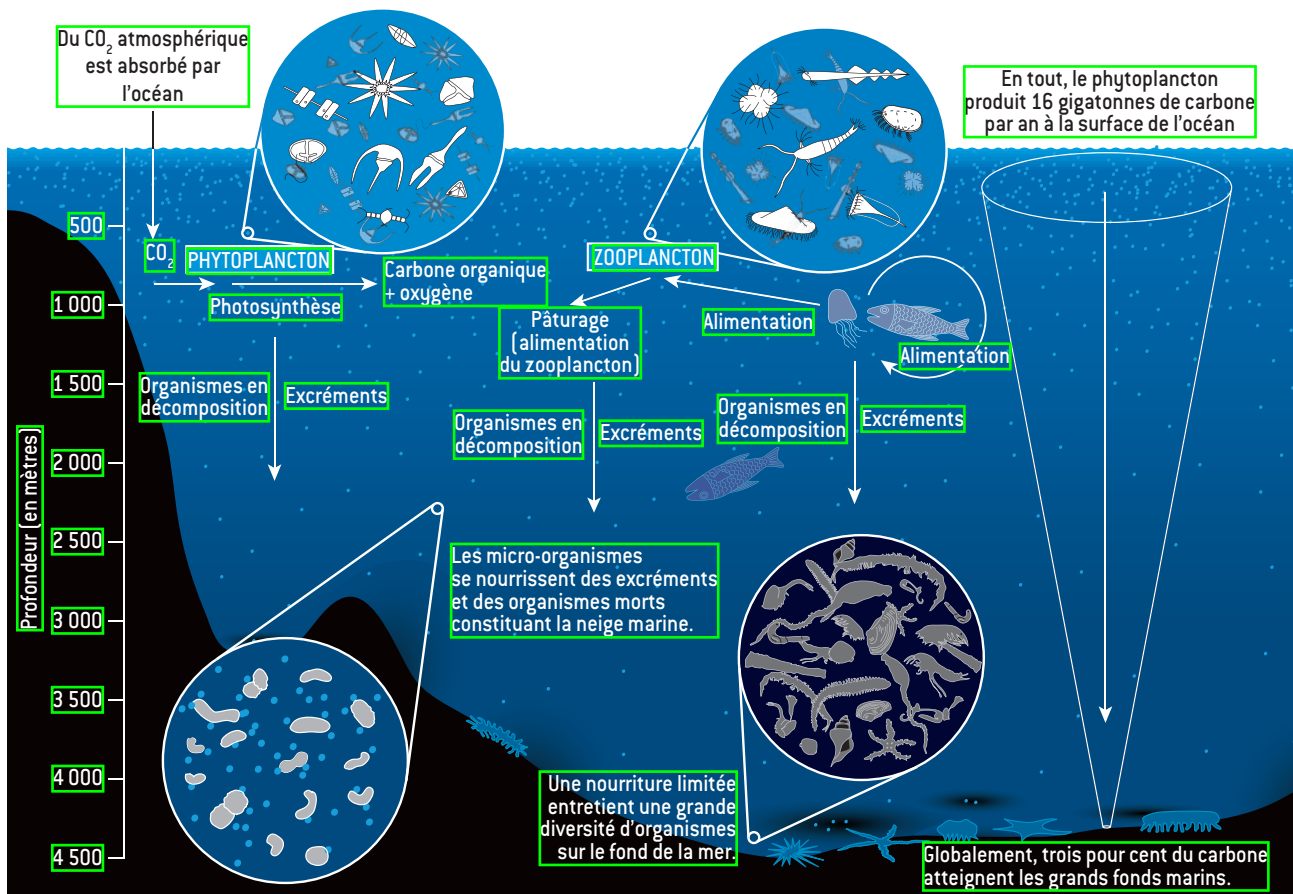
Pour répondre à cette question, je suis passé du plus vaste habitat de la Terre (les océans) à l'un des plus petits – les îles. L'existence de tailles extrêmes est bien documentée dans différentes îles. Le petit kiwi et l'énorme moa (un oiseau disparu mesurant plus de deux mètres) en Nouvelle-Zélande, le colossal dragon de Komodo sur l'île de Komodo en Indonésie, les éléphants pygmées (aujourd'hui disparus) sur les îles de la Méditerranée, la grenouille de la taille d'une fourmi des Seychelles, le cafard siffleur géant de Madagascar et la tortue géante des îles Galápagos ne sont que quelques-unes des multiples anomalies de taille rencontrées dans les îles. En 1964, le biologiste canadien John Bristol Foster a montré que, sur les îles, les grands mammifères rapetissent avec le temps. À l'inverse, les petits mammifères tendent vers le gigantisme. Les causes possibles de ces trajectoires évolutives originales sont multiples :

moins de prédateurs, moins de compétition avec d'autres espèces, un habitat réduit et des sources de nourriture potentiellement marginales.

Pénurie de nourriture, facteur de sélection

En 2006, nous avons découvert un schéma similaire dans les océans. Quand des gastéropodes d'eaux peu profondes ont évolué pour devenir des habitants d'eaux profondes, les petites espèces sont devenues plus grandes et les grandes espèces sont devenues plus petites. Nous avons aussi remarqué que leur taille n'avait pas évolué de façon symétrique : les taxons plus grands se sont bien plus miniaturisés que les petits n'ont grandi. Les deux types d'espèces ont donc convergé vers une taille légèrement inférieure à celle correspondant à une évolution symétrique. Depuis, j'ai observé ce schéma dans des taxons très différents, tels les bivalves et les requins.

Les îles et les océans profonds ont peu de choses en commun. Le fait que l'on observe une évolution des tailles similaire dans ces deux habitats si différents suggère que sa cause réside dans une caractéristique unique qu'ils partagent : la pénurie de nourriture. Dans les îles, la quantité de nourriture disponible est faible, car les végétaux, à la base de la chaîne alimentaire, ont peu de place pour prospérer. Ainsi, dans les deux habitats, la quantité de carbone organique produit serait probablement insuffisante pour entretenir une population constituée uniquement d'animaux géants. D'un autre côté, les organismes plus petits sont aussi désavantagés : ils sont incapables de se déplacer sur de longues distances pour rechercher leur nourriture ou de stocker d'importantes réserves de graisse pour jeûner pendant les périodes de pénurie alimentaire. Si ces pressions de sélection étaient égales, la taille évoluerait vers une valeur intermédiaire. La taille moyenne légèrement inférieure observée s'explique



4. LA VIE PRÈS DE LA SURFACE DE LA MER est la principale source d'approvisionnement en nourriture des habitants des profondeurs. Quand le phytoplancton, le zooplancton et les organismes qui s'en nourrissent rejettent des déchets ou meurent à la surface de la mer, ces restes – que l'on nomme la neige marine – coulent vers le fond de la mer. Les particules riches en

carbone s'agrègent en « flocons » en chemin ; leur cohésion est assurée par du mucus et d'autres matériaux produits en partie par les bactéries qui s'en nourrissent au cours de leur chute. Une grande partie de la neige marine est consommée en route. On estime que seulement trois pour cent du carbone produit près de la surface atteignent le fond de la mer.

alors par une sélection plus forte au détriment des tailles supérieures.

Face à la faible quantité de nourriture disponible, nombre d'organismes des abysses présentent des nouveautés évolutives. Un des grands habitants des profondeurs est l'isopode géant *Bathynomus giganteus*, un parent marin (de 36 centimètres de long, voir la figure 5a) du cloporte commun. Cet animal, le plus grand de l'ordre des *Isopoda* et l'un des plus grands crustacés connus, se déplace avec rapidité et efficacité : des pièges à appâts disposés sur le fond de la mer attirent en moins d'une heure des dizaines de ces nécrophages affamés. Chez les mammifères et les poissons, les animaux plus grands se déplacent plus vite et couvrent plus efficacement une surface donnée. La taille de l'isopode géant pourrait être une adaptation lui permettant d'accaparer la nourriture dans les grands fonds marins, tout en lui procurant une zone plus vaste de recherche de nourriture.

Autre caractéristique, l'isopode géant peut survivre huit semaines entre deux prises de nourriture. De même, en aquarium, le gastéropode *Neptunea amianta*, un escargot de la taille d'une balle de tennis, survit jusqu'à trois mois entre deux repas. Ce potentiel de jeûne traduit la capacité des grands organismes à constituer d'importantes réserves de lipides. *Neptunea amianta* a développé une autre stratégie adaptative : les femelles déposent des « casiers » robustes contenant des mil-

liers d'œufs. Le premier jeune à éclore rampe autour du casier d'œufs et dévore ses frères et sœurs non nés !

Les femelles de la famille des *Ceratiidae* (les baudroies, ou lottes de mer) assurent leur survie dans cet environnement pauvre en nourriture grâce à un long pédoncule (dérivé par évolution des épines de la nageoire dorsale) qui part de l'avant de la tête et agit comme un leurre. À l'extrémité de ce leurre, des bactéries symbiotiques émettent une lumière bleue qui attire les proies vers la gueule grand ouverte de la femelle (voir la figure 1). Les siphonophores du genre *Erenna*, organismes proches des méduses, utilisent aussi la lumière pour attirer les proies. De la lumière rouge, une rareté parmi les organismes luminescents, est émise lorsque le siphonophore agit ses tentacules, les faisant ressembler à des copépodes, une source de nourriture pour de nombreux petits poissons.

La bioluminescence compenserait aussi la faible disponibilité en nourriture dans un autre domaine vital – la sexualité. Trouver un partenaire dans une population peu nombreuse (du fait de la pénurie alimentaire) constitue un défi. Ainsi, de nombreux poissons utilisent un organe bioluminescent parmi leurs signaux sexuels. Chez les baudroies, la difficulté de trouver un partenaire sexuel se traduit par une autre nouveauté évolutive. Les baudroies mâles, minuscules comparés aux femelles, vivent pour trouver une partenaire et s'accoler à

elle. Les mâles recherchent les femelles grâce à un système olfactif très développé. Lors du contact, des enzymes fusionnent leur bouche au corps de la femelle, puis tous leurs organes s'atrophient, excepté leurs gonades. Ces mâles parasites deviennent alors une source durable de sperme pour les femelles parasitées.

Une diversité variant avec la profondeur

La grande variété d'adaptations à ces conditions extrêmes de rareté de la nourriture à de grandes profondeurs s'accompagne d'une riche biodiversité qui aurait choqué Edward Forbes. En 1968, l'étude comparative des fonds marins réalisée par Howard Sanders, de l'Institut océanographique de Woods Hole, aux États-Unis, a montré que la biodiversité des grands fonds marins dépasse la biodiversité côtière dans la zone tempérée et s'approche de la biodiversité des eaux tropicales peu profondes. Des travaux plus récents suggèrent que la diversité de la macrofaune dans les profondeurs pourrait même rivaliser avec celle des forêts tropicales humides. Dans des zones relativement petites, le nombre d'espèces coexistant sur les fonds marins surpasse : une zone de la taille d'une table basse contiendrait plus de 300 espèces !

Cependant, cette biodiversité est paradoxale. Dans des habitats comme les récifs



Robert Carter, Université d'État de Louisiane

5. POUR SURVIVRE EN EAUX PROFONDES, certains animaux ont développé des caractéristiques nouvelles. Grâce à sa taille, l'isopode géant *Bathynomus giganteus*, nécrophage, se déplace rapidement vers des sources de



Monterey Bay Aquarium Research Institute, 2005

nourriture éphémères et stocke des graisses pour les périodes de pénurie alimentaire (a). Le siphonophore du genre *Erenna* peut produire une luminescence rouge aux extrémités de ses tentacules qui les fait ressembler à

coralliens et les forêts tropicales humides, la biodiversité importante observée traduit la grande variété des environnements et des ressources disponibles en ces lieux. Cette variété soutient de multiples niches écologiques, sources d'une population riche et complexe. Par contraste, le fond de la mer, plat et boueux, sans récifs ou forêts pour apporter de la complexité, apparaît plus homogène. Comment cet habitat et son unique source de nourriture conduisent-ils à une telle biodiversité ?

Une réponse a été proposée en 1973 par H. Sanders et son collègue Fred Grassle : les deux biologistes ont suggéré que le fond marin était composé d'un patchwork de microhabitats de quelques centimètres carrés. Dans leur hypothèse, chaque élément de cette mosaïque fournit un ensemble spécifique de caractéristiques environnementales – les microhabitats – qui permet la vie d'un ensemble particulier d'espèces macrofauniques. Depuis, les caractéristiques de ces microhabitats sont devenues plus claires, tout comme les raisons pour lesquelles ils sont plus courants dans les profondeurs. Certains organismes assez grands, tels les oursins, les étoiles et concombres de mer, les vers et les crabes, construisent des terriers, tunnels et monticules dans les grands fonds marins et se déplacent à travers les sédiments. Ils créent ainsi une topographie à petite échelle qui structure le sol en microhabitats. Les grands fonds étant bien moins

souvent balayés par des courants rapides et constants que les eaux peu profondes, ces microhabitats y persistent plus longtemps et se développent.

Sur cette structure inégale, la neige marine ne se dépose pas uniformément : la microtopographie du fond marin la retient vraisemblablement dans les dépressions, tout comme la surface irrégulière d'une pelouse est recouverte d'un manteau neigeux inégal. La neige marine peut aussi s'agréger avant son arrivée sur le fond de la mer. Les Larvacés, un type de plancton, sécrètent autour d'eux une enveloppe de mucus qui filtre l'eau, retenant les particules. Ces enveloppes s'obstruent facilement et les Larvacés s'en dépouillent toutes les quatre heures. Les enveloppes obstruées

teau continental, à petite profondeur, la diversité des gastéropodes est faible. Lorsque la profondeur augmente (entre 200 et 2 000 mètres) et que l'apport en carbone diminue, leur diversité s'accroît sur les fonds marins. Puis, à des profondeurs d'environ deux à trois kilomètres, la diversité décline rapidement.

L'explication la plus vraisemblable de la décroissance conjointe de la productivité de carbone organique et de la diversité dans les abysses est l'effet Allee (du nom de son auteur, l'écologue américain Warder Allee) : moins la nourriture est disponible et moins d'individus de toutes les espèces sont entretenus. Quand le nombre d'individus d'une population décroît fortement, l'espèce concernée est plus susceptible de s'éteindre

LA BIODIVERSITÉ DES GRANDS FONDS MARINS dépasse la biodiversité côtière dans la zone tempérée et s'approche de la biodiversité des eaux tropicales peu profondes.

constituent alors une source de nourriture riche en carbone, qui arrive sur le fond marin groupée en masses compactes.

Ce schéma de la disponibilité en nourriture gouverne la biodiversité non seulement à petite échelle, mais aussi à des échelles plus grandes. En 1973, M. Rex a publié la première étude montrant la complexité de la répartition de la biodiversité en fonction de la profondeur. Sur le pla-

localement en raison de perturbations environnementales aléatoires, ce qui réduit la diversité totale d'une région.

Cependant, il reste une énigme : pourquoi, au tout début des grandes profondeurs – sur les fonds marins situés aux alentours de 200 mètres de profondeur –, une grande disponibilité en nourriture soutiendrait-elle moins d'espèces qu'à 1 000 ou 2 000 mètres ? On a avancé une



des copépodes, petits crustacés dont se nourrissent nombre de petits poissons (b). La femelle du gastéropode *Neptunia amianta* dépose des milliers d'œufs dans des « casiers ». Ils serviront de source de nourriture aux



premiers petits éclos (c). *Chondrocladia lampadiglobus*, ou éponge lampadaire, est carnivore (d). Alors qu'en général, les éponges filtrent l'eau pour se nourrir, celle-ci piège ses proies grâce à de minuscules crochets externes.

vingtaine d'hypothèses pour expliquer cette tendance, fondées sur divers éléments empiriques. En 2010, avec Jim Barry, de l'Institut de recherche de l'Aquarium de Monterey Bay, j'ai publié une étude qui pourrait résoudre l'énigme. Dans les canyons sous-marins – des vallées étroites qui entaillent le plateau continental de quelques centaines de mètres à plus de 2000 mètres –, la nourriture peut s'accumuler à la base des parois abruptes. Nous avons découvert qu'une mégafaune très mobile – par exemple les oursins, concombres de mer, crabes et étoiles de mer – converge vite dans ces zones et monopolise la nourriture. Comme ces animaux sont nombreux, leur activité remue intensément les sédiments. Cette perturbation et le manque de nourriture créent des conditions très rudes pour la macrofaune de ce milieu. Les espèces de la macrofaune sont donc moins nombreuses à survivre dans ces conditions. Les vers qui construisent des terriers dans les sédiments, notamment, ont peu de chance de survivre, car leurs terriers seraient vite détruits. Ainsi, à ces profondeurs intermédiaires où la dis-

ponibilité en carbone est élevée, la mégafaune, plus abondante, pourrait réduire la diversité de la macrofaune.

De façon générale, explique Nadine Le Bris, directrice du Laboratoire d'écogéochimie des environnements benthiques (CNRS-UPMC) de l'Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer, on constate que le nombre d'espèces est plus limité dans les écosystèmes abyssaux liés à des sources locales d'énergie – sources hydrothermales, sources de méthane, canyons, bois et os coulés. Mais à l'instar des crustacés abyssaux géants, la taille souvent exceptionnelle de ces organismes reflète une adaptation particulièrement efficace aux formes d'énergie disponibles.

Regards vers le passé

La façon dont l'océan réagit aujourd'hui au gradient de nourriture sur les fonds marins nous renseigne aussi sur le développement de la faune marine tout au long de l'histoire de la vie sur Terre, plus précisément sur les conditions environnementales (quantité de nourriture disponible,

c'est-à-dire de carbone) qui ont pu permettre ce développement.

Il y a environ 200 à 100 millions d'années, la révolution marine du Mésozoïque a constitué l'une des plus spectaculaires réorganisations de la vie sur notre planète. À cause d'une forte augmentation de la prédation dans les océans, certaines espèces ont décliné, tandis que d'autres, mieux adaptées (par exemple des gastéropodes possédant une coquille particulièrement solide), se sont diversifiées. En 1995, Richard Bambach, de l'Institut polytechnique et de l'Université d'État de Virginie, aux États-Unis, a suggéré que les besoins alimentaires des animaux marins s'étaient accrus durant cette période : plusieurs études montraient une augmentation de la prédation, de la mobilité, du fouissage, des morphologies anti-prédateurs, de l'incrustation d'organismes dans des roches immergées, de l'érosion due à des organismes sous-marins et de la taille de la faune. Selon R. Bambach, cette augmentation de l'activité dans les océans n'a pu avoir lieu que grâce à un apport suffisant en énergie. Donc, conclut-il, l'océan a forcément augmenté sa productivité en

DES ABYSES À LA BIODIVERSITÉ DES TROPIQUES

L'étude des grandes profondeurs peut éclairer notre compréhension d'autres types d'habitats. La biodiversité est importante sous les tropiques et décroît vers les pôles. Ce gradient de diversité des espèces en fonction de la latitude est observé chez une grande variété d'organismes dans des écosystèmes marins, terrestres et d'eau douce. Toutefois, les explications de ce gradient sont aussi variées que les organismes qui le suivent. Les différentes théories mettent en avant la variabilité du climat, la rudesse des conditions climatiques, la température, les rythmes de spéciation et d'extinction, le parasitisme, la prédation, la compétition entre espèces et la disponibilité en nourriture.

En 1993, Michael Rex, de l'Université du Massachusetts à Boston, a étudié, pour la première fois, le gradient de diversité des espèces en fonction de la latitude en mer profonde. M. Rex et ses collègues ont découvert un accroissement de la diversité des mollusques et des crustacés

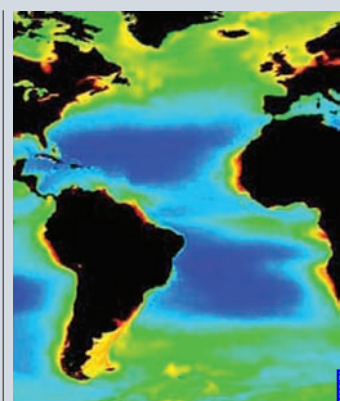
de l'océan Atlantique près de l'équateur et une réduction de celle-ci près des pôles. Des travaux ultérieurs ont montré que les foraminifères suivent également ce schéma. Ces résultats indiquent que les gradients de diversité des espèces en fonction de la latitude ne sont probablement pas liés à la température. En effet, les couches profondes de l'océan varient peu en température – seulement de 4°C – et peuvent être uniformes sur de vastes zones.

Or un autre élément varie bien avec la latitude : la quantité et la production de plancton à la surface de l'océan. De fait, deux séries de travaux ont montré que la dynamique de la disponibilité en nourriture peut entraîner des changements de la biodiversité des profondeurs sur des échelles de temps tant géologiques qu'annuelles.

Dans la première série d'études, Moriaki Yasuhara, de l'Institut Smithsonian, et ses collègues ont étudié l'histoire de crustacés minuscules, les ostracodes, sur les 500 000 der-

nières années dans les eaux profondes tropicales, à l'aide d'échantillons provenant de l'*Ocean Drilling Program*, un programme scientifique international d'exploration et d'étude des fonds marins. Ce dernier demi-million d'années a vu quatre cycles climatiques (succession de périodes glaciaires et de périodes interglaciaires) qui ont modifié radicalement la température en surface, les courants et la production de plancton des océans. La diversité des ostracodes dans l'océan tropical profond a chuté durant les périodes glaciaires, avec un abaissement concomitant de la production de plancton en surface. En conséquence, au cours de ces périodes, le gradient de diversité des ostracodes en fonction de la latitude a disparu. À l'inverse, durant les périodes interglaciaires, la diversité des ostracodes est devenue particulièrement riche.

La seconde série d'études concerne des échelles de temps beaucoup plus courtes – de l'ordre de la décennie. Les cycles de El Niño et de



Concentration en chlorophylle A (en milligrammes par mètre cube)

La température de l'océan varie peu avec la latitude, contrairement à la production de phytoplancton, évaluée par la concentration de chlorophylle mesurée en surface, et donc de carbone organique. Cette variabilité de production de nourriture à la surface des océans pourrait être l'un des facteurs de la biodiversité accrue observée sous les tropiques, tant en surface qu'en profondeur.

carbone organique durant cette période, sinon il n'aurait pu fournir l'énergie nécessaire à toutes ces innovations.

Dans un article récent, Seth Finnegan, de l'Université Stanford et de l'Institut de technologie de Californie, et ses collègues, dont je suis, avons tenté d'expliquer cette révolution marine du Mésozoïque sous un autre angle. Nous avons étudié, au cours du temps, les besoins énergétiques ou les demandes en nourriture probables d'un groupe prédominant dans les témoignages fossiles : les gastéropodes. Pour ce faire, nous avons combiné les informations issues des traces fossiles marines, des océans actuels – peu profonds comme profonds –, des données physiologiques provenant des espèces vivantes et, enfin, des équations mathématiques estimant la consommation d'énergie nécessaire à la vie d'un animal, c'est-à-dire l'énergie dont il a besoin pour son métabolisme.

Pour chiffrer les besoins de populations de gastéropodes dans un passé lointain, nous avons fait des extrapolations à partir de nos connaissances sur les gastéropodes actuels. En comparant les gastéropo-

des vivant avant et après la révolution marine du Mésozoïque, nous avons découvert que le besoin en énergie par individu s'était élevé d'environ 150 pour cent – un changement attribué en grande partie à l'augmentation de la taille des individus. Et si l'on ajoute à cette demande énergétique ne serait-ce que celle des carnivores marins, plus coûteux en énergie et dont la présence s'est accrue au Mésozoïque, on constate que le besoin en énergie après la révolution marine du Mésozoïque a dû être bien plus élevé.

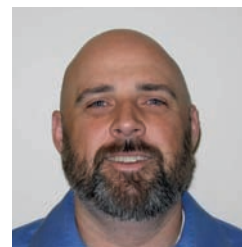
Nous avons montré en outre que cette augmentation de la demande énergétique s'est produite des profondeurs océaniques jusqu'aux eaux côtières. Par conséquent, pour permettre cette augmentation, la productivité de l'océan a forcément dû s'accroître considérablement il y a 200 à 100 millions d'années.

Un avenir incertain

Aujourd'hui, la Terre entre dans une nouvelle période de turbulences. Alors que les émissions de gaz à effet de serre modifient le climat de notre planète, de plus en plus de preuves indiquent que nous avons déjà modifié la production et les flux du carbone dans les océans. Des travaux récents montrent des réductions de 50 pour cent de la production de phytoplancton dans certaines régions océaniques et des augmentations de 50 pour cent dans d'autres. Daniel Boyce, de l'Université Dalhousie, aux États-Unis, et ses collègues ont récemment rapporté que la production de phytoplancton a globalement décliné au cours du siècle dernier. Cette redistribution et la diminution de la quantité de carbone à la surface de l'océan pourraient modifier la nature des fonds marins de façon importante ces prochaines décennies, aux côtés de la surpêche, de la pollution, de l'exploitation minière, du réchauffement et de l'acidification.

Les organismes des profondeurs vivent dans des conditions environnementales extrêmes de température, de pression et, bien sûr, d'alimentation. À l'échelle des individus comme à celle des écosystèmes, des transformations écologiques et évolutives extraordinaires ont permis une adaptation à ces conditions extrêmes. Alors que l'activité humaine modifie toujours plus les fonds marins, les espèces qui les peuplent vont-elles s'adapter ou disparaître ? La question est ouverte.

L'AUTEUR



Craig McCLAIN est directeur scientifique adjoint du Centre national de synthèse sur l'évolution de Durham, en Caroline du Nord aux États-Unis, et rédacteur en chef du blog scientifique *Deep-Sea News*, deepseanews.com.

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

La Niña, qui changent les températures de surface de l'océan Pacifique tropical, peuvent aussi modifier la répartition de la production planctonique en surface. Auraient-ils par là-même une influence sur la diversité de la faune ? Pour le savoir, un site appelé station M – situé à 4000 mètres de profondeur, au large de Santa Barbara, en Californie – a été surveillé pendant presque deux décennies. Des travaux effectués à la station M par Henry Ruhl et Ken Smith, de l'Institution Scripps d'océanographie et de l'Institut de recherche de l'Aquarium de Monterey Bay, aux États-Unis, montrent que lorsque des oscillations, dues à El Niño et à La Niña, apparaissent dans les températures de surface du Pacifique, la quantité de plancton varie de façon concordante. Et la diversité et l'abondance de la mégafaune et de la macrofaune des profondeurs changent également.

Ces deux séries d'études exceptionnelles confortent l'idée que les gradients de diversité des espèces en fonction de la latitude sont en partie dues à la variabilité de production du plancton en surface. Elles ont aussi mis au jour une répartition de la biodiversité dans les profondeurs en fonction du temps qui établit un lien encore plus fort entre la production en surface et la vie en eaux profondes.

BIBLIOGRAPHIE

S. Finnegan *et al.*, Escargot through time : an energetic comparison of marine gastropod assemblages before and after the Mesozoic Marine Revolution, *Paleobiology*, vol. 37, pp. 252-269, 2011.

C. McClain et J. Barry, Habitat heterogeneity, biogenic disturbance, and resource availability work in concert to regulate biodiversity in deep submarine canyons, *Ecology*, vol. 91, pp. 964-976, 2010.

C. McClain *et al.*, The island rule and the evolution of body size in the deep sea, *Journal of Biogeography*, vol. 33, pp. 1578-1584, 2006.

H. A. Ruhl et K. L. Smith, Shifts in deep-sea community structure linked to climate and food supply, *Science*, vol. 305, pp. 513-515, 2004.

P. Geistdoerfer, La vie dans les abysses, Belin, 1995.

Plongés dans le noir par un virus ?

David Nicol

Des virus informatiques ont mis hors service certains systèmes de contrôle industriels. Le réseau électrique pourrait être la prochaine cible.

Durant l'été 2010, les médias ont révélé qu'un virus avait paralysé les installations d'enrichissement d'uranium iraniennes de Natanz, pourtant hautement sécurisées. La plupart des virus se répandent partout où ils le peuvent, mais celui-ci, nommé *Stuxnet*, avait une cible bien particulière, non connectée à Internet. *Stuxnet* a été placé sur une clef USB, remise à un technicien qui ne se doutait de rien et qui l'a branchée sur un ordinateur faisant partie d'une installation sécurisée. Une fois introduit, le virus s'est répandu silencieusement pendant des mois, à la recherche d'un ordinateur connecté à un composant électronique banal : un contrôleur logique programmable. C'est un petit boîtier en plastique rempli d'électronique, couramment utilisé pour contrôler les rouages des installations industrielles : valves, engrenages, moteurs et autres interrupteurs.

Les contrôleurs électroniques dans lesquels *Stuxnet* s'est introduit étaient associés aux centrifugeuses à uranium, élément clef des ambitions nucléaires iraniennes. Des milliers de ces centrifugeuses traitent le minerai d'uranium pour en extraire l'uranium enrichi nécessaire à la fabrication d'armes nucléaires. Dans

L'ESSENTIEL

✓ Tous les composants du réseau de distribution de l'électricité sont aujourd'hui contrôlés par ordinateur. C'est la plus grande infrastructure physique interconnectée par de l'électronique.

✓ Le virus *Stuxnet*, qui a endommagé des installations nucléaires iraniennes, a montré à quel point les machines sont vulnérables face à un logiciel malveillant.

✓ Le réseau électrique, plus vaste, a encore plus de points faibles. Une attaque coordonnée pourrait mettre à terre une grande partie du réseau électrique d'un pays.

✓ Des mesures commencent à être prises pour renforcer la sécurité.

les conditions de fonctionnement normal, ces centrifugeuses tournent tellement vite que leurs bords externes se déplacent juste au-dessous de la vitesse du son (environ 1 230 kilomètres par heure). *Stuxnet* a accéléré la rotation des centrifugeuses jusqu'à ce que leur bord atteigne pratiquement 1 600 kilomètres par heure, vitesse où le rotor a de fortes chances de voler en éclats. Et pendant ce temps, il envoyait de faux signaux aux systèmes de contrôle, indiquant que tout était normal. De fait, bien que l'étendue exacte des dégâts iraniens reste floue, le virus a au moins en partie atteint sa cible : l'Iran a dû remplacer début 2010 environ 1 000 centrifugeuses sur le site d'enrichissement de Natanz.

Le virus *Stuxnet* illustre à quel point les installations industrielles sont vulnérables face à la menace d'une cyberattaque. Le virus a visé et détruit des équipements sécurisés, et il a échappé à la détection pendant des mois. Cette attaque serait l'œuvre d'Israël, peut-être avec l'aide des États-Unis. Mais de nombreux États ou groupes terroristes pourraient utiliser une technologie similaire contre des infrastructures civiles critiques n'importe où dans le monde.



Et malheureusement, les réseaux électriques sont bien plus faciles à infiltrer qu'une installation d'enrichissement d'uranium. Le réseau électrique américain, ou de tout autre pays développé, est constitué de milliers d'unités interconnectées qui fonctionnent en coordination étroite. En un sens, c'est la plus grosse machine jamais construite : un circuit électrique géant qui transporte l'énergie depuis les centrales jusqu'aux ampoules, aux réfrigérateurs et autres machines à des milliers de kilomètres à la ronde. C'est une machine ajustée avec une grande précision. Le courant qui circule dans le réseau pour satisfaire aux besoins d'un pays augmente et diminue en suivant exactement la demande. Les générateurs fournissent un courant alternatif en phase avec l'ensemble du réseau. Et si la panne d'un seul composant a des répercussions limitées sur ce vaste circuit, une cyberattaque coordonnée en de multiples points critiques du réseau électrique pourrait endommager les équipements au point de paralyser un pays pour des semaines, voire des mois.

Étant donné la taille et la complexité du réseau électrique, il faudrait beaucoup de temps et d'efforts pour mettre sur

pied une attaque coordonnée. *Stuxnet* était le virus informatique le plus avancé jamais vu, sans doute le fruit de services secrets. Mais le code de *Stuxnet* est maintenant en libre accès sur Internet, ce qui augmente le risque qu'un groupe terroriste l'adapte pour attaquer une nouvelle cible ! Un groupe technologiquement peu avancé, comme Al Qaida, n'a probablement pas l'expertise nécessaire pour infliger des dommages significatifs au réseau électrique. Mais ce n'est pas le cas des *hackers* qui louent leurs services en Chine ou dans les pays de l'ex-Union soviétique.

Même des réseaux non reliés à Internet sont vulnérables

Il y a un an, j'ai participé à un exercice simulant une cyberattaque fictive sur le réseau électrique. Parmi les participants se trouvaient des représentants des entreprises de distribution de l'électricité, des agences gouvernementales et de l'armée. Dans ce test, des logiciels malveillants s'introduisaient dans un certain nombre de postes électriques (des installations qui servent à la fois à la trans-

mission et à la distribution d'électricité), mettant hors d'usage les dispositifs qui assurent une tension constante. À la fin de l'exercice, une demi-douzaine de postes avaient été détruits, privant d'électricité pour plusieurs semaines tout un État de l'Ouest.

Des ordinateurs contrôlent le réseau à tous les niveaux, depuis les générateurs à combustible fossile ou les centrales nucléaires jusqu'aux lignes de transport urbain. La plupart de ces ordinateurs utilisent des systèmes d'exploitation grand public comme *Windows*, ce qui les rend presque aussi vulnérables que votre micro-ordinateur aux virus informatiques.

Un virus comme *Stuxnet* est efficace principalement pour trois raisons : les systèmes d'exploitation considèrent *a priori* que les logiciels qui s'exécutent sont légitimes ; ils présentent souvent des failles qui autorisent l'intrusion d'un virus ; et les installations industrielles permettent rarement d'utiliser des protections disponibles pour le grand public.

Même en sachant tout cela, un ingénieur système aurait jusque récemment écarté d'un revers de la main la possibilité qu'un logiciel malveillant lancé à distance puisse parvenir aux contrôles critiques

du réseau électrique, puisque ce système n'est pas directement connecté à Internet. Mais depuis, *Stuxnet* a démontré que les réseaux sans connexion permanente vers l'extérieur sont eux aussi vulnérables. Les virus peuvent par exemple se propager physiquement *via* des clés USB utilisées par des employés. Même la plus petite porte dérobée peut servir d'entrée pour un cambrioleur entreprenant.

Prenons le cas d'un poste électrique. De tels postes reçoivent des courants à haute tension venant d'une ou plusieurs centrales, les synchronisent, abaissent la tension et les répartissent entre de multiples lignes pour la distribution locale. En cas de panne sur une de ces lignes, un disjoncteur coupe le courant. Toute l'électricité envoyée dans cette ligne est alors répartie entre les autres lignes. Si les lignes de distribution sont proches de leur limite de capacité, une attaque qui coupe la moitié des lignes et maintient les autres ouvertes a toutes les chances de surcharger ces dernières.

Des portes d'entrée multiples

Ces disjoncteurs sont encore aujourd'hui équipés de modems auxquels les techniciens peuvent se connecter. Or il n'est pas difficile de trouver ces numéros. Les pirates ont inventé depuis longtemps des programmes pour composer tous les numéros de téléphone d'un central téléphonique et repérer ceux auxquels un modem répond. Quand cela est combiné à une faible protection, comme des mots de passe bien connus ou pas de mot de passe du tout, un attaquant peut utiliser ces modems pour s'introduire dans le réseau d'un poste électrique. De là, il pourrait configurer les disjoncteurs de façon à ce qu'ils passent outre une situation dangereuse, au lieu d'ouvrir le circuit.

Les nouveaux systèmes ne sont pas plus sûrs. De plus en plus, les dispositifs déployés dans les postes électriques communiquent entre eux par ondes radio à faible puissance. Celles-ci ne s'arrêtent cependant pas aux murs du poste électrique. Un pirate peut s'introduire dans le réseau en se cachant dans les parages avec son ordinateur. Les réseaux Wi-Fi cryptés sont plus sûrs, mais un attaquant compétent peut quand même casser le cryptage avec des logiciels faciles à se procurer. De là, il pourrait lancer une « attaque de

l'homme du milieu » qui fait transiter par son ordinateur toutes les communications entre deux ordinateurs légitimes, ou faire accepter son ordinateur comme légitime. Il serait alors en mesure d'envoyer des messages de contrôle frauduleux qui perturberaient le fonctionnement des disjoncteurs.

Une fois qu'un virus s'est introduit dans un réseau, sa première consigne est en général de se répandre le plus possible. Là encore, *Stuxnet* illustre des stratégies bien connues. Il a tiré profit d'un mécanisme du système d'exploitation *Windows*, qui lit et exécute un fichier nommé *autoexec.bat* à chaque fois qu'un utilisateur s'identifie pour localiser des pilotes de périphériques, lancer un antivirus, ou d'autres fonctions de base. Mais le système suppose que tout fichier ayant le bon nom est un code fiable. Il suffit ainsi de modifier le fichier *autoexec.bat* pour qu'il exécute le code malveillant.

Les attaquants peuvent aussi exploiter la structure du marché de l'électricité. Dans le cadre de la dérégulation, l'électricité est produite, transportée et distribuée par des compagnies concurrentes, dans le cadre de contrats qui portent sur diverses échéances, obtenus dans des enchères en ligne. La branche commerciale d'une compagnie doit recevoir en

permanence des informations en temps réel de sa branche d'exploitation afin de faire des transactions intéressantes ; inversement, la branche exploitation doit savoir combien d'électricité elle doit produire pour répondre aux commandes de la branche commerciale. C'est là que se trouve le talon d'Achille. Un pirate pourrait pénétrer dans le réseau commercial, y dénicher des noms d'utilisateurs et des mots de passe, et utiliser ces identifiants pour accéder au réseau d'exploitation.

D'autres attaques pourraient se répandre en exploitant des scripts cachés dans des fichiers. On trouve des scripts partout (les fichiers PDF, par exemple, contiennent souvent des scripts qui gèrent l'affichage), mais ils représentent aussi un danger potentiel. Une entreprise de sécurité informatique estimait récemment que plus de 60 pour cent des attaques ciblées utilisent des scripts enfouis dans des fichiers PDF. Le simple fait de lire un fichier corrompu peut laisser entrer un attaquant dans votre ordinateur.

Imaginons qu'un attaquant pénètre dans un premier temps sur le site Web d'un fournisseur de logiciels et remplace un manuel en ligne par un faux manuel corrompu semblable au premier. Le cyberattaquant envoie alors à un ingénieur de la centrale électrique un message, qui va

ATTAKES INFORMATIQUES, DÉGÂTS PHYSIQUES

A mesure que l'on relie les machines industrielles au réseau Internet, le potentiel de nuisance des pirates augmente. Les attaques recensées ces dix dernières années montrent que le réseau électrique n'est pas le seul point faible : tout ce qui comporte un circuit intégré peut être pris pour cible.



La centrale nucléaire de Davis-Besse (Ohio, États-Unis).

Avril 2000

Un ancien employé mécontent d'une entreprise de traitement de l'eau vole des composants radio et les utilise pour envoyer de fausses instructions aux équipements des égouts du Queensland, en Australie. Plus de 750 000 litres d'eaux usées sont déversées dans les parcs et les rivières du secteur.

2000

2001

inciter l'ingénieur à télécharger le manuel piégé. Ce faisant, l'ingénieur ouvre involontairement les portes de sa centrale au cheval de Troie. Une fois que le fichier corrompu se trouve à l'intérieur, l'attaque proprement dite peut commencer.

Désynchroniser, surcharger, ralentir

Un programme malveillant qui a réussi à s'introduire dans un réseau de contrôle peut émettre des instructions aux conséquences dévastatrices. En 2007, le Département de la Sécurité intérieure des États-Unis a simulé une cyberattaque au Laboratoire national de l'Idaho. Au cours de cet exercice, nommé *Aurora*, un ingénieur jouant le rôle de pirate s'est frayé un chemin jusque dans un réseau connecté à un générateur de taille moyenne. Comme tous les générateurs, il produit du courant alternatif. L'attaquant a émis une rapide séquence d'instructions marche/arrêt aux disjoncteurs d'un générateur test du Laboratoire, qui ont eu pour effet de le désynchroniser par rapport au courant alternatif du réseau. À « contre-courant » du réseau, le générateur n'a pas résisté longtemps : une vidéo aujourd'hui déclassifiée montre l'énorme machine d'acier tremblant comme si un train l'avait

heurtée. Quelques secondes plus tard, la pièce était envahie de fumée.

Les systèmes industriels peuvent aussi tomber en panne quand ils sont poussés au-delà de leurs limites. Des centrifugeuses qui tournent trop vite se désintègrent. Un attaquant pourrait faire en sorte qu'un générateur électrique produise une tension supérieure à ce que les lignes de transport peuvent supporter. La puissance excédentaire serait alors évacuée sous forme de chaleur, entraînant l'affaissement de la ligne, voire sa fusion. Si des lignes affaissées entrent en contact avec quoi que ce soit, cela peut créer un énorme court-circuit. Des relais de protection sont prévus pour empêcher de tels courts-circuits, mais une cyberattaque pourrait également modifier le fonctionnement de ces relais, de façon à infliger des dégâts. En outre, l'attaque pourrait aussi modifier l'information envoyée à la station de contrôle, empêchant les opérateurs de remarquer qu'il y a un problème, comme dans ces films où les cambrioleurs envoient au gardien des images de vidéosurveillance truquées.

Les stations de contrôle elles aussi sont vulnérables aux attaques. Les personnels en salle d'opérations suivent sur écran les données transmises par les postes électriques, puis émettent des instructions pour en modifier les paramètres de contrôle.

Une station est souvent responsable du suivi de centaines de postes.

La communication entre les stations de contrôle et les postes électriques utilise des protocoles spécialisés qui peuvent eux-mêmes être vulnérables. Si un intrus parvient à lancer une attaque de l'homme du milieu, il peut insérer un message dans un échange ou corrompre un message existant, voire simplement injecter un message correctement formaté, mais hors contexte, pour induire une défaillance d'un ordinateur à l'une ou l'autre extrémité.

Une autre stratégie est de retarder les messages transitant entre les stations de contrôle et les postes électriques. D'ordinaire, le délai entre la mesure du courant dans un poste et la réaction par la station de contrôle est court (sinon, cela revient à conduire une voiture en regardant là où vous étiez il y a dix secondes !). Le manque de données sur la situation en temps réel du réseau était en partie responsable de l'immense panne de courant qui a frappé l'Amérique du Nord en 2003.

Pour la plupart de ces attaques, nul besoin de logiciel sophistiqué comme *Stuxnet* : la boîte à outils du pirate de base suffit. Par exemple, des pirates prennent fréquemment le contrôle de milliers d'ordinateurs de bureau auxquels ils font faire ce qu'ils veulent, formant un réseau de

Janvier 2003

Le virus informatique *Slammer* contourne de nombreux pare-feu pour infecter le centre de contrôle de la centrale nucléaire de Davis-Besse dans l'Ohio (États-Unis). Le virus se répand à partir de l'ordinateur d'un sous-traitant jusque dans le réseau commercial, d'où il gagne les ordinateurs contrôlant l'exploitation de la centrale, entraînant la panne de multiples systèmes de sécurité. La centrale était à l'époque hors réseau.



Mars 2007

Des agents du gouvernement américain simulent une cyberattaque, nommée *Aurora*, sur un générateur électrique au Laboratoire national de l'Idaho. Le générateur est détruit.

Janvier 2008

Un responsable de la CIA révèle que des pirates informatiques auraient souvent infiltré les services d'électricité hors des États-Unis, avec des tentatives d'extorsion. Dans au moins un cas, les pirates auraient réussi à couper l'alimentation électrique de plusieurs villes, non nommées.

Avril 2009

Selon le *Wall Street Journal*, des cyberespions de Chine, Russie et d'autres pays auraient pénétré le réseau électrique américain et y auraient laissé des logiciels pouvant être utilisés pour le mettre hors service.



Octobre 2010

Des responsables de la sécurité en Iran, en Indonésie et ailleurs signalent la découverte de *Stuxnet*, un virus conçu pour attaquer des systèmes de contrôle industriels fabriqués par *Siemens*, qui commandent les centrifugeuses iraniennes.

2002

2003

2004

2005

2006

2007

2008

2009

2010

2011

«machines zombies», ou botnet. Le type le plus simple d'attaque par botnet consiste à inonder un site Internet de messages quelconques pour ralentir ou bloquer la circulation de l'information. Ces attaques par «dénis de service» pourraient être utilisées pour ralentir le trafic entre les postes électriques et les stations de contrôle.

Des botnets pourraient également s'implanter au sein même des ordinateurs du réseau de postes électriques. En 2009, le botnet *Conficker* avait investi dix millions

d'ordinateurs. Un tel botnet pourrait intégrer des ordinateurs des postes électriques, et son contrôleur pourrait alors leur faire exécuter simultanément telle ou telle instruction. D'après le Département de l'Énergie des États-Unis, la mise hors service de 200 postes de transmission soigneusement choisis, soit deux pour cent du total, mettrait à genoux 60 pour cent du réseau électrique.

Quand une entreprise comme *Microsoft* a connaissance d'une faille de sécurité

de ses logiciels, elle fournit un correctif. Les utilisateurs du monde entier téléchargent ce correctif, mettent à jour leur logiciel et se protègent ainsi de la menace. Malheureusement, les choses ne sont pas aussi simples sur le réseau électrique.

Même si le réseau électrique utilise du matériel et des logiciels grand public, les responsables informatiques des centrales électriques ne peuvent pas simplement corriger les logiciels défectueux quand des failles se révèlent. Les systèmes de contrôle

DES FAILLES DANS LE RÉSEAU

Le réseau électrique repose sur un équilibre complexe entre la quantité d'énergie dont les usagers ont besoin et la quantité produite par les centrales. Des dizaines de composants orchestrent la circulation de l'électricité sur des distances

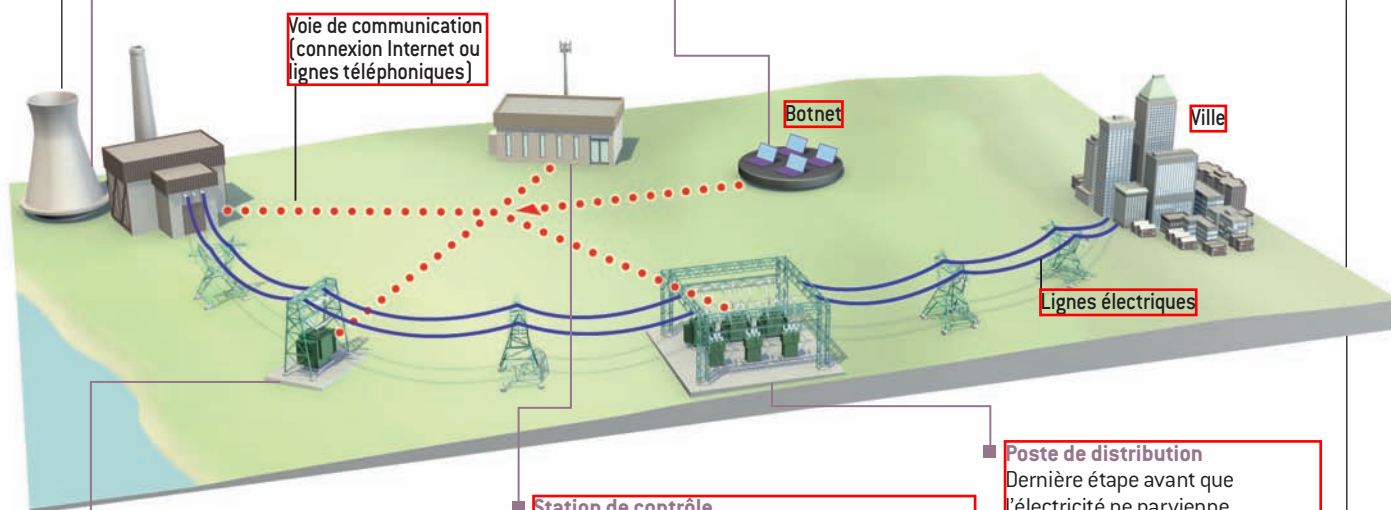
de centaines de kilomètres. Chacun de ces composants peut être mis à mal par des cyberattaquants. Voici quelques-uns des points les plus sensibles et comment ils pourraient être attaqués.

Centrale électrique

Que la centrale utilise du charbon, de l'uranium ou même l'énergie solaire, l'électricité injectée dans le réseau doit être un courant alternatif synchronisé avec le reste du réseau. Un attaquant pourrait envoyer des instructions à un générateur pour lui faire fournir un courant déphasé. Cela équivaut à passer la marche arrière alors que vous roulez sur une route à 80 kilomètres par heure : le générateur, opposé à l'inertie du réseau, va griller.

Transmission de l'information

La station de contrôle doit savoir à la seconde près ce qui se passe à chaque étape du transport pour que les techniciens puissent réagir et adapter les différents paramètres du réseau. Des pirates contrôlant des milliers d'ordinateurs (un botnet) pourraient ralentir les communications en inondant la station de contrôle de messages inutiles (attaque par déni de service). Les opérateurs prendraient des décisions en s'appuyant sur des informations anciennes, ce qui peut être inadapté à la situation réelle.



Poste de transmission

Le courant livré par les centrales électriques est à très haute tension, afin de limiter les pertes d'énergie durant le transport, dues à la résistance électrique. Les postes de transmission sont la première étape pour abaisser cette tension. De nombreux postes parmi les plus anciens sont équipés de modems auxquels les techniciens se connectent pour effectuer la maintenance. Des pirates peuvent les utiliser pour accéder aux réglages sensibles et les modifier.

Station de contrôle

Centres névralgiques du réseau électrique, les stations de contrôle surveillent l'ensemble des conditions de fonctionnement. C'est également là qu'est gérée l'adéquation entre l'offre et la demande. Quand la demande augmente, une entreprise mobilise plus de capacité de production pour répondre aux besoins. Bien que la salle d'opérations d'une station de contrôle ne soit pas censée être raccordée à Internet, la branche commerciale de la compagnie l'est. Un pirate peut s'infiltrer dans le réseau commercial et passer dans le réseau d'exploitation pour attaquer des systèmes de contrôle critiques.

Poste de distribution

Dernière étape avant que l'électricité ne parvienne aux particuliers et aux entreprises, ces postes peuvent combiner le courant provenant de plusieurs centrales différentes et l'envoyer sur des centaines de lignes plus petites. Les stations les plus récentes sont parfois équipées de dispositifs de communication radio ou Wi-Fi. Un intrus qui se cache à proximité du poste pourrait intercepter les échanges et leur substituer des instructions illégitimes.

Édith Hébert

du réseau ne peuvent pas être arrêtés pour maintenance ne serait-ce que quelques heures par semaine: ils doivent fonctionner en permanence. Les opérateurs sont aussi assez conservateurs. Les réseaux de contrôle sont en place depuis longtemps, et les opérateurs ont leurs routines qui ont fait leurs preuves. Ils se méfient de tout ce qui risquerait de menacer la disponibilité ou d'interférer avec l'exploitation normale.

Sécuriser le réseau d'ici 2020

Le NERC (*North American Electric Reliability Corporation*), un organisme de tutelle des opérateurs du réseau américain, a édicté un ensemble de normes destinées à protéger l'infrastructure face à un danger clair et immédiat. Les entreprises de service public doivent maintenant identifier leurs dispositifs critiques et faire la preuve auprès d'auditeurs nommés par le NERC qu'ils sont capables de les protéger des intrusions.

Mais les audits de sécurité, comme les audits financiers, ne sont jamais exhaustifs. Les détails techniques audités ne sont qu'une sélection de points, et la conformité se limite à ce que l'auditeur voit.

La stratégie de protection la plus courante consiste à dresser une sorte de ligne Maginot électronique. La première ligne de défense est un «pare-feu», un dispositif à travers lequel passent tous les messages électroniques. Chaque message possède un en-tête indiquant d'où il vient, où il va, et le protocole utilisé pour l'interpréter. Sur la base de ces informations, le pare-feu laisse passer certains messages et en bloque d'autres. Les agences de certification doivent s'assurer que les centaines ou les milliers de pare-feu d'un site sensible sont correctement configurés. Pour ce faire, ils identifient quelques éléments critiques, se procurent les fichiers de configuration du pare-feu et essaient de déterminer manuellement comment un pirate traverserait le pare-feu.

Mais les pare-feu sont tellement complexes qu'il est difficile d'examiner la multitude de possibilités. Des outils automatisés seraient utiles. Notre équipe de l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign a développé le *Network Access Policy Tool*, aujourd'hui utilisé par des entreprises de service public et des équipes d'évaluation. Ce logiciel libre n'a besoin que des fichiers de configuration des pare-

feu d'une entreprise. Il a d'ores et déjà permis d'identifier un certain nombre de chemins d'accès inconnus ou tombés dans l'oubli, que des attaquants auraient pu exploiter.

Le Département américain de l'Énergie a établi une feuille de route pour renforcer la sécurité du réseau d'ici à 2020. L'un des buts est de mettre au point un système qui reconnaît une tentative d'intrusion et qui y réagit automatiquement. Cela bloquerait un virus de type *Stuxnet* dès sa sortie de la clef USB. Mais comment un système d'exploitation peut-il savoir à quels programmes faire confiance?

Une solution serait d'utiliser une technique cryptographique appelée fonction de hachage à sens unique. Une

fonction de hachage prend un nombre immensément grand, par exemple le nombre de 0 et de 1 d'un fichier informatique, et le convertit en un nombre beaucoup plus petit, qui joue le rôle de signature. Il est très improbable que deux programmes différents et assez longs aient la même signature. Imaginez que chaque programme qui veut s'exécuter sur un système doive d'abord passer par la fonction de hachage. Sa signature est alors vérifiée par comparaison avec une liste de référence. Si elle ne correspond pas, l'attaque s'arrête là.

Le Département de l'Énergie recommande également d'autres mesures de sécurité, comme des vérifications de sécurité physiques aux postes de travail des opérateurs (des puces radio dans les badges d'identification, par exemple). Il souligne également le besoin d'exercer un contrôle plus strict sur les communications entre les dispositifs à l'intérieur du réseau électrique. La démonstration *Aurora* impliquait un programme malveillant qui faisait croire au dispositif de contrôle du générateur qu'il envoyait des instructions fiables...

Ces mesures nécessiteront du temps, de l'argent et des efforts, mais elles en valent la peine. Si nous voulons sécuriser le réseau électrique d'ici 2020, il va falloir accélérer le rythme. En espérant que d'ici là, il n'arrive rien de fâcheux. ■

L'AUTEUR



David NICOL est professeur au Département de génie électrique et informatique de l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign, aux États-Unis. Il est aussi directeur de l'*Information Trust Institute* de cette université.

LA MISE HORS SERVICE DE 200 POSTES DE TRANSMISSION bien choisis, soit deux pour cent du total, mettrait à genoux 60 pour cent du réseau électrique américain.

BIBLIOGRAPHIE

J.-Y. Marion et M. Kaczmarek, *Boulevard du cybercrime, Dossier Pour la Science* n°66, janvier-mars 2010, www.pourlascience.fr/u.php?s=cybercrime

J. Eisenhauer et al., *Roadmap to secure control systems in the energy sector, Energetics Incorporated*, janvier 2006. www.oe.energy.gov/csroadmap.htm

D. Geer, *Security of critical control systems sparks concern, IEEE Computer*, vol. 39, n°1, pp. 20-23, janvier 2006.

Trustworthy Cyber Infrastructure for the Power Grid, projet interuniversitaire financé par le Département américain de l'Énergie : www.tcipg.org

What Is the Electric Grid, and What Are Some Challenges It Faces?, Département américain de l'Énergie, www.eia.doe.gov/energy_in_brief/power_grid.cfm

SUR LE WEB

Le portail gouvernemental français sur la sécurité informatique : <http://www.ssi.gouv.fr/>

La vidéo de l'exercice *Aurora* : <http://bit.ly/pls407-video-aurora>

HISTOIRE DES SCIENCES

L'affaire de la gale : histoire d'un concept scientifique

Au XIX^e siècle, les médecins accusent un jeune docteur en médecine d'avoir falsifié ses travaux pour prouver l'existence du parasite de la gale. Leur argumentation révèle tous les obstacles qui les empêchaient d'envisager cette idée.

Danièle GHESQUIER-POURCIN

Comment les concepts scientifiques se construisent-ils ? Selon l'idée la plus répandue, leur marche est linéaire et sa vitesse est fonction du nombre d'individus qui se penchent sur le problème et du temps qu'ils lui consacrent. On croit aussi généralement qu'une découverte est le fait d'un seul individu : Fleming a découvert la pénicilline, Einstein la relativité, Darwin le phénomène d'évolution et Pasteur le vaccin contre la rage. Ces croyances sont fausses. Il suffit d'examiner l'histoire d'une découverte prise au hasard pour s'en persuader. La marche des idées n'est pas linéaire. Les concepts se construisent au gré de nombreux retours en arrière et d'apports par des voies indirectes, insoupçonnées auparavant, car la diversité est le seul artisan de la progression du savoir.

De plus, l'ordre des composants de la chaîne des idées qui forment le concept est important : par exemple, on ne pouvait expliquer le phénomène d'évolution sans reconnaître auparavant l'influence du milieu. Enfin, si l'on associe une découverte à une seule personne, c'est parce que l'on porte une attention particulière à celui qui sait rassembler les idées pour reconstituer le concept. D'où viennent ces idées ? Souvent de loin, apportées par d'autres individus qui ont une part dans la construction du concept, bien que celle-ci reste ignorée. En d'autres termes, le savoir est une construction collective qui ne se concrétise que lorsque le nombre d'éléments nécessaires

est en présence dans un ordre déterminé. C'est ce que nous enseigne l'étude archéologique des nombreuses strates qui constituent le concept, comme nous allons le voir ici sur un exemple représentatif de cette marche de la science : l'histoire de la maladie, plus précisément d'une « maladie spécifique », la gale humaine.

Le sarcopte de Galès : une imposture ?

Parmi les différents types de maladies connus aujourd'hui – maladies spécifiques, de carence, génétiques, etc. –, la maladie spécifique, pathologie due à un agent externe « vivant » tel qu'un parasite, une bactérie ou un virus, fut la première à être élucidée. Ce type de maladie offrait plusieurs énigmes à résoudre : l'essence de la maladie, le rôle de l'animal, les conditions de sa pénétration dans l'organisme-hôte, son mode d'action dans le déclenchement de la maladie, son mode de vie à l'intérieur du corps malade, les mécanismes de la contagion et ceux mis en jeu physiologiquement pour se débarrasser de l'intrus, les thérapeutiques susceptibles d'aider le malade à recouvrer la santé.

Une de ces interrogations était primordiale : quelle était la cause de la maladie ? La réponse à cette question conditionnait celles à toutes les autres questions, en particulier celles relatives à la thérapeutique qui, dans la maladie spécifique, se confond avec la destruction de la cause. La cause était

aussi la seule façon de définir la maladie au moyen d'une propriété qui lui était spécifique.

L'histoire de la gale humaine analysée ici inclut une affaire de fraude scientifique supposée qui n'a jamais été élucidée. Au travers de cette « affaire de la gale », que nous tenterons de clarifier, se dessinera l'itinéraire des idées qui constituent le concept de gale et celui de maladie spécifique en général.

L'affaire de la gale est d'habitude présentée comme une fraude scientifique qui aurait été commise, en 1812, par un étudiant nommé Jean-Chrysanthé Galès [1783-1854] pour sa thèse de médecine, sous la direction du médecin-chef de l'hôpital Saint-Louis de Paris, Jean-Louis Alibert, spécialiste des maladies de peau. Elle a été racontée de nombreuses fois, sans qu'aucune voix se soit jamais élevée pour défendre Galès, dont la culpabilité n'a pourtant jamais été démontrée.

La gale est caractérisée par de violentes démangeaisons, des boutons et des croûtes sur la peau. Aujourd'hui, on sait que la démangeaison est due à un arthropode de l'ordre des acariens, le sarcopte. Ce parasite creuse des sillons dans le derme afin d'y déposer ses œufs, sectionnant à la fois le derme et les petits vaisseaux qu'il trouve sur son chemin (voir la figure 1). Le tissu réagit en formant de petites vésicules remplies d'un liquide séreux transparent, fait de fragments cellulaires et d'un peu de sang. Si la gale n'est pas soignée, ces vésicules grossissent et se remplissent de pus, devenant des pustules. Au début du XIX^e siècle, les patients traités pour la gale dans les hôpitaux parisiens se trou-

vaient souvent à un stade avancé de la maladie, ce qui explique pourquoi Alibert avait nommé la gale *psoris pustulosa*, ou psoride pustuleuse (voir la figure 3).

Pour sa thèse de médecine, consacrée au diagnostic de la gale et à la recherche de ses causes, Galès extrait les sarcoptes des vésicules. Il les observe au microscope et compare leur aspect à celui publié par d'autres auteurs avant lui. Pour les différencier de ce que l'on nomme à l'époque les mites de la farine (*Acarus siro*), acariens que l'on trouve dans la farine et dont l'aspect est très similaire, il s'inocule les deux animaux, montrant que seul le sarcopte provoque la gale.

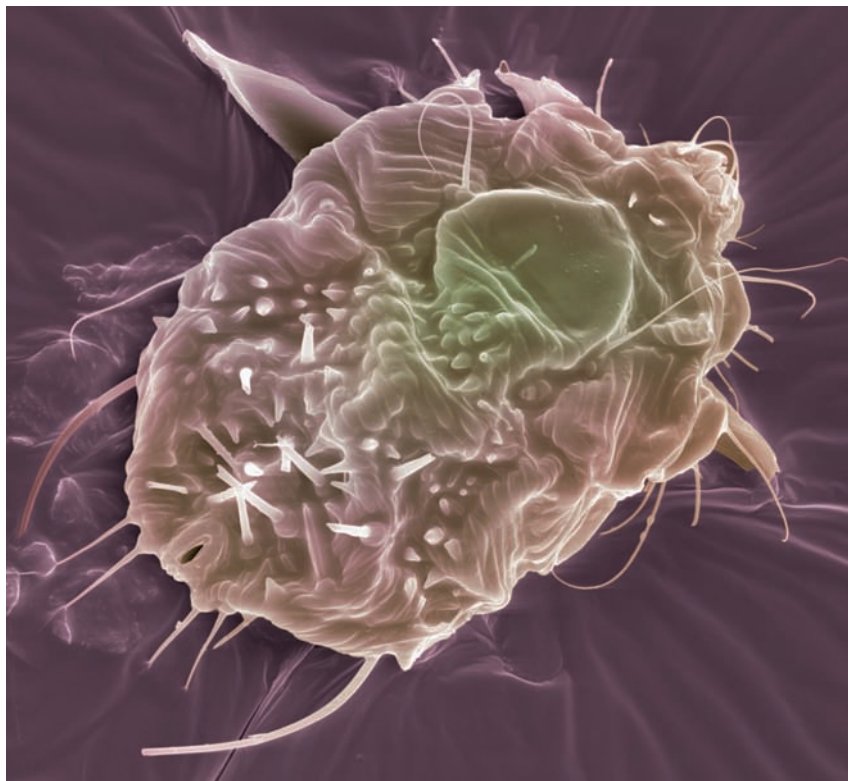
Mais dans les années suivantes, certains faits font accuser Galès de mystification. Tout d'abord, personne ne retrouve le sarcopte sur les galeux. On s'aperçoit aussi que les dessins de sa thèse représentent la mite de la farine et non le sarcopte de la gale (voir la figure 2). Galès aurait donc falsifié ses expériences en montrant à son jury la mite de la farine, qu'il est facile de se procurer, au lieu du sarcopte de la gale.

Il fallut attendre 1834, soit 22 ans, pour que Simon-François Renucci, un autre étudiant en médecine et élève d'Alibert, retrouve le sarcopte dans les sillons creusés par le parasite dans la peau des galeux. Cette redécouverte était très tardive pour une raison simple : personne avant Renucci n'avait eu l'idée d'explorer les sillons, car on recherchait en vain le sarcopte dans les vésicules ou les pustules galeuses.

D'autres l'avaient vu

La localisation de l'acarien dans les sillons accentua les soupçons portés sur Galès, car on pensait que celui-ci avait trouvé le sarcopte dans les pustules de gale où, d'évidence, il ne se trouvait pas. En fait, Galès n'avait exploré que les vésicules « naissantes » qui, contrairement aux pustules (tardives), contiennent parfois le sarcopte ; mais ses contemporains n'ont pas prêté attention à ce détail.

Ainsi, à partir de 1834, deux indices font de Galès un coupable : les dessins de sa thèse, qui représentent la mite de la farine, et la localisation du sarcopte, qu'on ne retrouve pas dans les pustules.



© Visuals Unlimited/Corbis

Ce qui vient à l'esprit en lisant cette accusation, c'est que la gale était une maladie mal connue à l'époque de la thèse de Galès et que celui-ci n'a pas fraudé volontairement, mais a confondu les deux mites sous le microscope. Que savait-on de la gale et du sarcopte en 1812 ? La lecture de la littérature médicale et populaire sur la gale détrompe immédiatement le lecteur conciliant.

On connaissait la gale et les habitudes du sarcopte depuis longtemps : un médecin anglais, Thomas Moffett, avait écrit en 1634 que l'animal vivait dans les sillons et non dans les pustules. On connaissait le mécanisme de contagion : il avait été expliqué en 1687, soit plus de 100 ans avant la thèse de Galès, par un médecin italien, Giovanni Bonomo, qui avait trouvé le sarcopte dans les vésicules de gale. Et il était notoire dans le milieu médical que le naturaliste suédois Carl von Linné avait confondu le « ciron » (le sarcopte) de la gale et la mite de la farine en les classant comme deux variétés d'une même espèce.

Ces faits suscitent plusieurs interrogations : si l'on savait tout de la gale au début du XIX^e siècle, pourquoi Galès a-t-il dû refaire la

1. LE SARCOPTÉ DE LA GALE HUMAINE, ici observé en microscopie électronique à balayage, est un arachnide de l'ordre des acariens. Si ce parasite a été observé et décrit plusieurs fois entre les XII^e et XIX^e siècles, il ne fut accepté comme cause de la maladie qu'en 1834.

L'AUTEUR



Danièle GHESQUIER-POURCIN est chargée de recherche à l'INSERM et travaille au sein de l'Unité REHSEIS du CNRS/Université Paris VII.

démonstration pour sa thèse ? La cause de la gale avait-elle été oubliée et, dans ce cas, pourquoi ? Les conditions d'expérimentation concernant l'identification du sarcopte avaient-elles changé à ce point, pour que l'on ait reproché à Galès une faute pardonnée à Linné ? Si Bonomo, premier découvreur du rôle du sarcopte, avait trouvé celui-ci dans les vésicules de gale, comment a-t-on pu reprocher à Galès d'en avoir fait autant ? Enfin, pourquoi les chercheurs de sarcoptes continuaient-ils obstinément, après la thèse de Galès, à rechercher l'animal dans les vésicules ou les pustules de gale, au lieu de le faire dans les sillons ?

Nous avons tenté de répondre à ces questions en montrant que c'est l'évolution des idées scientifiques – non seulement entre 1812 et 1834, mais aussi durant les sept siècles séparant les premières observations du sarcopte (nommé aussi ciron ou acare) de son association définitive avec la gale – qui a fait apparaître et disparaître l'animal selon que le milieu médical croyait ou non à son existence et à son rôle dans la maladie.

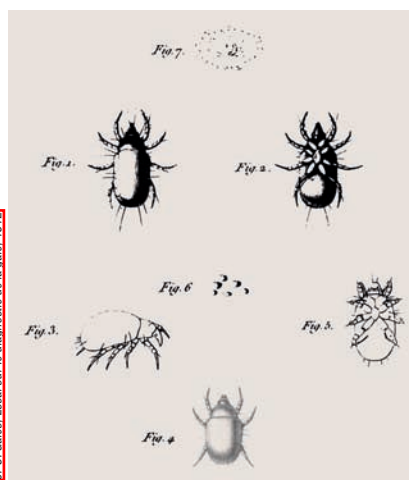
La maladie a-t-elle une cause ou plusieurs ?

Dès que l'acare apparut dans la gale, au XII^e siècle, la signification de son rôle fut confrontée à une série d'« obstacles épistémologiques », selon le terme du philosophe Gaston Bachelard. Il s'agit des barrages intellectuels, présents chez un individu, qui s'opposent à l'évolution de sa pensée, soit parce qu'ils appartiennent à des théories anciennes en contradiction avec les faits présents, soit parce qu'ils s'opposent au style de pensée de l'individu concerné.

Le premier obstacle rencontré par l'acare fut la théorie humorale. Selon cette théorie d'origine grecque et admise par la médecine arabe, la maladie n'était pas due à l'acare, mais aux humeurs corrompues qui créaient un déséquilibre. Pour guérir la maladie, il était nécessaire de rétablir l'équilibre des humeurs. L'acare était, en quelque sorte, un effet secondaire.

Le deuxième obstacle est lié au premier : selon la définition donnée par Aristote, les

parasites étaient des animaux qui naissaient spontanément dans d'autres animaux, créés par les humeurs viciées de la maladie. Cet obstacle épistémologique provient de ce que Bachelard nomme la difficulté à remettre en question les théories admises sans se sentir irrespectueux et prétentieux. Car la définition d'Aristote avait créé des habitudes de pensée qui rendaient toute autre explication impossible : l'existence de l'acare était ainsi liée à la théorie de la génération spontanée, c'est-à-dire l'apparition d'organismes vivants dépourvus de parents, qui fut acceptée jusqu'aux travaux de Pasteur. Ainsi,



2. LE DESSIN DU SARCOPTÉ de la gale publié par Jean-Chrysanthé Galès dans sa thèse en 1812, « fait d'après nature par M. Meunier, peintre d'histoire naturelle ». L'animal, long de 0,5 millimètre, est représenté adulte (1, 2, 3), jeune (4) et mort (5) aux côtés de ses œufs présumés (6) et d'une pustule de gale « mise à découvert par l'enlèvement de l'épiderme » (7).

en 1834, appelé comme expert en microscopie, le chimiste François-Vincent Raspail pense que le sarcopte peut être le parasite de la gale au lieu d'être « son artisan ». Cette accessoirité de l'acare dans la gale explique pourquoi il fut absent de la pensée médicale jusqu'au XVII^e siècle.

Au XVII^e siècle, l'intérêt pour les animaux microscopiques a fait apparaître l'acare dans le champ scientifique. Le concept de parasite était attaqué pour la première fois. Toutefois, on n'envisageait pas pour autant l'animal comme étant la cause de la gale. Le concept d'une cause spécifique nécessai-

rement associée à une maladie spécifique n'existait pas encore. Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, les médecins expliquaient une maladie spécifique par un ensemble de causes suffisantes. C'est le troisième obstacle pour l'acare de la gale : l'animal n'était qu'une des causes de la maladie, une des causes de la contagion.

En outre – quatrième obstacle –, il n'y avait aucune spécificité entre une cause et son effet. Parce que l'on croyait que les causes de maladies étaient nombreuses, la même cause de maladie pouvait conduire à plusieurs effets, spéciaux ou typiques suivant les lieux, les événements ou les tendances organiques rencontrées. Ainsi, jusqu'à ce que le concept de cause nécessaire soit établi, l'acare de la gale n'avait aucune chance de jouer un rôle important dans la genèse de la maladie.

Le cinquième obstacle prit son importance seulement vers 1820, lorsque, sous l'influence des hygiénistes, on expliqua la transmission de la maladie par les miasmes de l'environnement. On réserva alors le nom de maladie contagieuse à un petit nombre de maladies telles que la variole, dont les épidémies étaient fréquentes jusqu'à la fin du XVIII^e siècle. Les critères de la maladie contagieuse devinrent très stricts : contagion par les croûtes et les pustules, exanthème, prurit, infection par le contact et protection par inoculation. La gale remplissait tous ces critères. Cette ressemblance entre la variole et la gale constitua le cinquième obstacle pour l'acare de la gale.

C'est à partir de ce moment que les pustules de gale prirent de l'importance, qu'Alibert nomma la gale *psoris pustulosa* et que les chercheurs de sarcoptes, y compris Raspail, traquèrent l'animal dans les pustules de gale. C'est le modèle de la variole qui apporta la confusion entre vésicules et pustules et qui fit disparaître l'acare après la thèse de Galès. Cet obstacle épistémologique correspond au besoin d'uniformiser les principes, les méthodes et les phénomènes en science dans une recherche de simplification. Mais la science ne répond pas à cette uniformité.

Après la thèse de Galès, quand la gale fut considérée spécifique seulement si elle ressemblait précisément au modèle de la variole,

un nouvel obstacle apparut : la variole elle-même devint aspécifique. François-Joseph-Victor Broussais, médecin très en vogue auprès des étudiants en médecine, soutint l'idée que la maladie était une déviation de la physiologie normale alors que, depuis la Révolution, la maladie était ontologique (désignée par des symptômes et des signes). Les causes de la maladie, qui étaient déjà multiples, accessoires et séparées de leur effet, devinrent encore plus secondaires, car toute l'attention se focalisa sur la fonction perturbée. La contagion, notamment, n'était plus prise en compte. Et si la syphilis et la variole ne dépendaient pas de la contagion, pourquoi la gale aurait-elle dû en dépendre ? Le sarcopte, qui n'appartenait plus à aucun système, devint impossible à trouver.

À peu près 20 ans après la thèse de Galès, un autre changement eut lieu dans le concept de cause spécifique. La révolution de 1830, à laquelle les étudiants en médecine participèrent en masse, mit les opposants politiques, tel Broussais, au pouvoir. Les idées de Broussais, dont le succès devait beaucoup à sa très forte image républicaine, furent examinées plus scientifiquement par le corps médical, qui détecta les nombreux échecs de sa thérapeutique. Dans le même temps, les idées sur la spécificité de la maladie retrouvèrent la liberté confisquée par le pouvoir politique. La spécificité de la gale fut de nouveau possible, comme Bonomo, Alibert et Galès l'avaient proposé en leurs temps, en insistant sur le fait que seul l'acare était responsable de la gale.

La connaissance suit des chemins détournés

Enfin, en 1855, Joseph Rollet, chirurgien en chef à l'Antiquaille de Lyon, sépara dans sa classification les parasites, tels l'acare de la gale et les champignons microscopiques, des autres agents contagieux des maladies de la peau – les « virus », qui provoquent la variole et la rougeole. Il semblait alors bien établi que la transmission de toutes les maladies spécifiques de la peau peut être expliquée par la multiplication des agents ; mais dans le cas des « virus », cette affirmation était encore spéculative ; s'ils étaient



V.-L. Alibert, Description des maladies de la peau, vol. 2, 1825

3. UNE MAIN GALEUSE, planche extraite de la *Description des maladies de la peau* de Jean-Louis Alibert (1825), le directeur de thèse de Jean-Chrysanthé Galès. Alibert nommait « psoride pustuleuse vulgaire » la gale, en raison des pustules qu'elle entraîne lorsqu'elle n'est pas soignée, semblables aux pustules de la variole.

perçus comme un matériel vivant, la relation avec les parasites n'était pas faite. Le virus était encore dans cette obscurité d'où est réapparu l'acare de la gale.

La gale humaine est un parfait exemple des difficultés que rencontrent les idées nouvelles lorsqu'elles doivent éliminer d'anciens modes de pensée pour progresser sur des bases nouvelles. Cette histoire est une histoire des idées, une histoire de la pensée et des théories médicales, qui sont modelables non seulement par les idées en provenance du milieu médical, mais aussi par les idées en provenance d'autres domaines scientifiques et de la sphère socio-politico-économique. La pensée collective est sans arrêt en mouvement, modifiée par les relations de pouvoir, capables de renforcer l'influence d'un acteur ou de réduire celle d'un autre. Elle peut être influencée par un savant comme par un livre de médecine populaire, par ce qui se passe dans un amphithéâtre de médecine ou dans le village corse de Renucci.

À l'heure où l'on parle de mettre la connaissance au service de l'économie, cette histoire montre qu'orienter la recherche n'est pas une intervention génératrice de découvertes. Les idées ont leur indépendance et, s'il est possible de retracer le chemin qu'elles ont pris, il ne l'est pas de modifier celui-ci. Toute action dans ce sens prend le risque de retarder la marche de la connaissance. ■

✓ À ÉCOUTER

Jeudi 8 septembre 2011, Danièle Ghesquier-Pourcin évoquera l'affaire de la gale dans la partie « Actualités » de l'émission **La marche des sciences**, sur France Culture de 14h à 15h.
www.franceculture.com

✓ BIBLIOGRAPHIE

D. Ghesquier-Pourcin, *Itinéraire des idées. L'affaire de la gale*, Hermann, 2011.

B. Dujardin, *L'histoire de la gale et le roman de l'acare*, *Arc. Belg. dermat. syphil.*, vol. 2, pp. 13-75, 1946 ; vol. 3, pp. 1-49, 1946 ; vol. 3, pp. 129-75, 1949.

J.-C. Galès, *Essai sur le diagnostic de la gale, sur ses causes, et sur les conséquences médicales pratiques à déduire des vraies notions de cette maladie*, thèse de médecine, Paris, 1812. En ligne sur books.google.fr

J.-L. Alibert, *Description des maladies de la peau*, Paris, 1806 et 1825, 2 vol., pp. 235-238.

LOGIQUE & CALCUL

Le principe de Peter

La différence entre un texte humoristique et des travaux universitaires sérieux est parfois mince. Le principe de Peter est l'exemple même d'une loi dont le statut reste incertain.

Jean-Paul DELAHAYE

Vous prenez dix dés, vous les lancez. Vous relancez ceux qui n'ont pas donné 1 jusqu'à ce que tous les dés donnent 1.

Un moment viendra où chaque dé montrera 1. Cette évidence appliquée au problème de la promotion dans les entreprises conduit au *principe de Peter*. Si, à chaque fois qu'un employé remplit correctement sa fonction, on le promeut à un poste où il aura à faire une tâche différente, alors arrivera un moment où l'employé occupera une fonction où il fera mal son travail ; il n'aura alors plus de promotion et restera dans cet emploi mal adapté.

Exprimé avec le langage de l'Américain Laurence Peter (1919-1990) : dans une hiérarchie, toute personne finit par atteindre son niveau d'incompétence. De ce principe de Peter découlent deux corollaires :

- plus le temps passe, plus grande est la proportion de postes occupés par des incompétents.

- la charge de travail des personnes compétentes ne cesse de croître.

Si le livre de Peter coécrit avec Raymond Hull (paru en 1969) fut un succès mondial, c'est sans doute dû à ce double aspect de sa thèse centrale : elle apparaît parfaitement logique, mais, bien sûr, elle ne peut pas être vraie... ce serait absurde.

Peter expliquait dans son livre que si « tout va toujours mal » (sous-titre de l'ouvrage de 1969), c'est parce que rien ne peut s'opposer à son implacable logique.

Comment y voir clair ? Comment évaluer l'impact réel des cas où le principe de

Peter est l'explication correcte ? Comment aussi organiser la gestion du personnel et les promotions d'une structure hiérarchique pour contrer et annuler ses éventuels effets ?

Plusieurs catégories de travaux sérieux sur le principe de Peter ont été menées dans de nombreuses disciplines : économie, sociologie, psychologie, management, théorie des jeux, sciences politiques et, plus étonnant, en physique, informatique et biologie.

Intrépide recherche universitaire

Il y a d'abord les études concrètes : dans une entreprise sélectionnée, on mesure à coup de pourcentages et de courbes synthétiques tirées des statistiques disponibles si les effets du principe de Peter sur la productivité sont patents. C'est ainsi qu'on a pu établir que la productivité scientifique des universitaires américains baisse à la suite de leur recrutement ferme (la célèbre *tenure*)... mais que ce n'est pas général, comme le montre une étude de Mareva Sabatier publiée en 2009 à propos des promotions dans les universités françaises.

Le deuxième type de travaux est celui des études à bases mathématiques. Il se fonde sur des modèles à équations continues où les variables sont des nombres réels, et où, comme on le fait en économie et en physique, sont introduits des paramètres globaux (productivité de l'entreprise, aptitude des agents, difficulté des tâches, etc.) et leurs relations. Devenus équations et résolus, ces modèles montrent ce qu'on craignait :

la productivité baisse inexorablement au cours du temps alors qu'augmente l'incompétence moyenne dans les hiérarchies pratiquant la promotion interne au mérite. Bien sûr, les mises en équations simplifient la réalité des organisations hiérarchiques et il est souvent possible de compliquer les modèles en ajoutant quelques paramètres supplémentaires qui amènent alors à des conclusions... opposées à celles du modèle initial.

La baisse de productivité constatée chez les sujets qui viennent de bénéficier d'une promotion ne résulte-t-elle pas de la régression vers la moyenne ? Le phénomène a été observé par le Britannique Francis Galton, au XIX^e siècle, à propos de la comparaison entre les tailles des parents et des enfants (les enfants des géants sont plus petits que leurs parents, les enfants des nains sont plus grands). L'efficacité d'un employé occupant une fonction où il vient d'être promu est statistiquement moins bonne que sa précédente efficacité, puisque, justement, il a obtenu une promotion du fait qu'il était efficace. En s'approchant maintenant de la moyenne, ce qui est statistiquement inévitable, l'efficacité baisse. Pour certains chercheurs, c'est la raison unique du principe de Peter.

Les expériences en laboratoire constituent une troisième méthode d'étude. On prend des sujets humains et on reproduit artificiellement une situation de promotion en demandant aux personnes participant à l'expérience de se comporter comme elles le feraient dans la réalité. Pour que les décisions prises par les sujets le soient sérieusement et que leurs efforts pour réussir

1. Le principe de Peter se manifeste

Le principe de Laurence Peter est une maxime humoristique : « Dans une hiérarchie, tout employé tend à s'élever jusqu'à atteindre son niveau d'incompétence. » Il semble résulter d'une logique imparable et, parmi ses corollaires, il y a : « Avec le temps, tout poste est occupé par une personne incapable d'en remplir les fonctions. »

Le management est une science étrange où, heureusement, l'humour permet de ne pas prendre trop au sérieux les modes aux conséquences parfois désastreuses, créées et promues par des gourous pas toujours conscients des subtiles réalités humaines et des spécificités nationales non négligeables.



La question est posée : comment repérer les incompetents ? Une journaliste, Anne Steiger, a proposé les critères suivants.

- (1) Sa force : déléguer. Il aime se présenter comme le chef d'orchestre de son équipe.
- (2) Il brasse de l'air, fait beaucoup de bruit, affirme à qui veut bien le croire qu'il est très occupé.
- (3) Dans les couloirs, il marche vite et a toujours l'air préoccupé.
- (4) Si, pour lui, l'erreur est humaine, l'attribuer à quelqu'un d'autre que lui est encore plus humain.
- (5) Quoi qu'il arrive, l'incompétent s'efforce de faire comme si tout avait été prévu.
- (6) Aimable avec ses supérieurs hiérarchiques, il se plaît à humilier ses subordonnés, particulièrement ceux dont il a le plus besoin.
- (7) Friand des relations de pouvoir, il rappelle quotidiennement à ses subordonnés qu'ils lui sont... subordonnés.
- (8) Il détruit toute preuve de son échec quand il ne réussit pas.
- (9) Pour communiquer ses ordres, il use et abuse des Post-it, des courriels et des notes de service pour mettre de la distance et éviter les face-à-face.
- (10) En réunion, il s'efforce d'avoir toujours le dernier mot, quitte à s'attribuer ce qui vient d'être dit.

Le principe de Peter est un exemple d'affirmation dont la vérité semble incontestable alors qu'en même temps, il ridiculise le monde social qu'il décrit. Vivons-nous dans un monde absurde ?

D'autres lois du même type ont été proposées pour nous faire rire... et réfléchir

« Quand un dispositif fonctionne bien, on l'utilise au-delà de ce pour quoi il était prévu, et cela jusqu'à ce qu'il ne fonctionne plus » (dû à William Corcoran, un spécialiste américain de sûreté nucléaire).

« Un logiciel informatique qui donne satisfaction tend à se développer et à se perfectionner jusqu'au point où plus personne n'en maîtrise la complexité... et le fonctionnement. »

« Les employés incompetents sont directement promus aux fonctions de management, sans nécessairement avoir été compétents à aucun poste » (loi de Dilbert du dessinateur de BD américain Scott Adams).

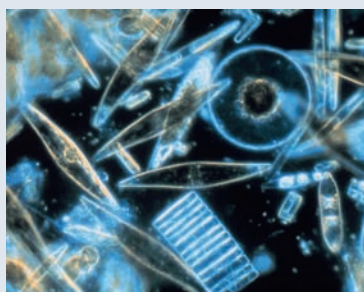
« Le travail s'étale de façon à occuper tout le temps disponible pour son achèvement » (loi de Parkinson, de l'historien et essayiste britannique Cyril Parkinson).

« Les personnes aux capacités limitées formulent des conclusions fausses et prennent de mauvaises décisions, mais leur incompétence limite aussi leur aptitude d'analyse critique et elles ne peuvent donc ni voir, ni comprendre, ni corriger leurs erreurs » (effet de biais cognitif Dunning-Kruger).



2. Le phytoplancton

Même dans la nature, le principe de Peter semble jouer un rôle. La compétition entre les espèces de phytoplancton, dont le grand nombre est depuis longtemps apparu paradoxal, est difficile à comprendre. En 2009, William Durham et ses collègues, aux États-Unis, ont identifié un étrange mécanisme expliquant en partie cette grande variété d'espèces, et qui semble un cas remarquable de principe de Peter dans le monde biologique.



Sur la côte Ouest de l'Amérique du Nord, un grand nombre d'espèces différentes de phytoplancton sont visibles dans les parties les plus hautes de l'océan. Ces espèces sont disposées en couches parallèles horizontales et peu épaisses, comme si l'espèce de chaque couche était spécialement adaptée à une profondeur donnée.

La plupart des espèces de ce phytoplancton sont mobiles. La capacité à se mouvoir de couche en couche serait pour elles un avantage, car cela faciliterait leur accès à la nourriture et à la lumière. Cependant, un étrange phénomène se produit : cherchant à accéder à la surface, chaque micro-organisme mobile monte jusqu'au niveau où les variations de courant créées par l'approche de la surface déstabilisent son mécanisme d'orientation et perturbent son mouvement. Ce dernier devient alors désordonné, l'empêchant de poursuivre vers la surface et le condamnant alors à rester à une profondeur donnée qui n'est en rien avantageuse pour lui.

Tout se passe donc comme si chaque organisme unicellulaire de ces espèces de phytoplancton progressait vers la surface jusqu'à atteindre son « niveau d'incompétence », où, bien que cela ne lui soit pas particulièrement favorable, il reste bloqué, inapte à poursuivre son ascension.

soient réels, ils sont rémunérés à la fin de l'expérience en fonction de leur succès. Là aussi, le protocole (c'est-à-dire la description du jeu auquel on invite les sujets à jouer) est souvent très simplifié par rapport à la réalité, et les résultats obtenus n'ont qu'une portée limitée.

Enfin, plus récemment, on a eu recours à des études informatiques fondées sur ce que l'on dénomme des simulations multi-agents. Nous y reviendrons, car elles conduisent à des conclusions nouvelles et étonnantes. Résumons d'abord les conclusions classiques auxquelles le travail universitaire avait déjà conduit.

Certains travaux contestent le principe de Peter : non, il n'est pas toujours exact que les promotions internes au mérite produisent l'effet désastreux dénoncé, car les responsables lucides et attentifs le prennent en compte pour décider des promotions. D'autres études concluent que le principe de Peter est vrai et ses effets mesurables, en particulier quand on pratique la méthode des modèles mathématiques. Edward Lazear, de l'Université Stanford, affirme que l'effet se réduit à celui de la régression vers la moyenne, inévitable, et qu'il n'empêche pas que les promotions se fassent au mieux de l'intérêt des entreprises.

Limiter les dégâts

Bien sûr, ceux qui concluent à l'existence réelle des effets du principe de Peter prodiguent des conseils (souvent de bon sens) pour limiter ses dégâts.

- Former les gens et les tester pour s'assurer de leurs capacités avant de les promouvoir dans de nouvelles fonctions.

- Limiter les promotions internes et mettre les employés en concurrence avec de nouvelles recrues provenant de l'extérieur ; il ne faut toutefois pas abuser de ces recrutements exogènes qui démotiveraient des employés de l'entreprise toujours écartés au profit de nouveaux venus.

- Augmenter les salaires, car c'est utile pour tirer le mieux de chacun, mais sans nécessairement changer les fonctions de ceux que l'on augmente. Laisser les gens compétents exercer leurs talents à leur niveau

fera coïncider l'intérêt de l'entreprise et celui de ses salariés : les promus ne deviennent pas incompétents.

- Une pratique, mise en œuvre depuis longtemps dans l'armée, limite le temps qu'un militaire reste à un niveau donné de la hiérarchie et, s'il n'est pas promu à temps, l'armée s'en débarrasse pour qu'il ne stagne pas à son niveau d'incompétence.

L'outil de la simulation multi-agents mis en œuvre récemment pour étudier le principe de Peter vient de produire des résultats contre-intuitifs, et nous allons présenter le modèle utilisé.

Les travaux ont été réalisés par une équipe de trois physiciens de l'Université de Catane, en Sicile : Alessandro Pluchino, Andrea Rapisarda et Cesare Garofalo. Leur article, publié dans la revue *Physica A*, leur a valu un prix Ig Nobel (à ne pas confondre avec le prix Nobel attribué en Suède chaque année). Selon les organisateurs du prix Ig Nobel qui, en anglais, se prononce à peu près comme *ignoble* : « Les prix *Ig Nobel* couronnent des prouesses qui font rire les gens au premier abord, et les font ensuite réfléchir. Ces prix ont pour but de rendre hommage à l'originalité et à l'imagination, ainsi que d'attiser l'intérêt des gens pour la science, la médecine et la technologie. »

Aussi farfelus que semblent parfois les travaux récompensés par les Ig Nobel, il ne s'agit pas uniquement de canulars ou de blagues de potache : André Geim, prix Ig Nobel en 2000 pour la lévitation d'une grenouille, s'est vu ensuite décerner le prix Nobel (le vrai !) de physique en 2010 pour ses recherches sur le graphène.

Dans notre cas, le côté inattendu des conclusions a valu le prix à l'étude italienne sur le principe de Peter qui prouve que des promotions décidées au hasard ne seraient pas absurdes dans certaines organisations hiérarchiques. Notons que cette conclusion suggérant d'utiliser l'arbitraire des tirages au sort n'est pas totalement opposée à l'une des conclusions formulées par Peter lui-même : il a suggéré, pour éviter les effets de son principe, d'exploiter arbitrairement la structure de la société en classes, en plaçant d'office en haut de la hiérarchie non pas les plus méritants, mais les membres

des classes les plus élevées de par leur naissance. Ce qui était un trait d'humour chez Peter est-il devenu une vérité prouvée par la simulation numérique ?

Le modèle de Catane

Une structure hiérarchique de 160 personnes est créée dans l'ordinateur en utilisant le langage de programmation *Netlogo* et la méthode multi-agents. Celle-ci consiste à définir des entités informatiques indépendantes qui interagissent comme le font dans la réalité les objets, les êtres vivants ou les humains, cela en limitant autant que possible les décisions centralisées. L'autonomie des agents de ces modèles en facilite la programmation, et en s'approchant du monde réel qui est composé d'agents indépendants, on accroît la taille des systèmes que l'on simule (avec parfois plusieurs millions d'agents) tout en augmentant la fiabilité et la pertinence des résultats obtenus.

Dans l'organisation pyramidale simulée à Catane, il y a six niveaux hiérarchiques, qui

comportent 81 éléments pour le niveau 6 (le plus bas), 41 pour le niveau 5, 21 pour le niveau 4, 11 pour le niveau 3, cinq pour le niveau 2 et un seul pour le niveau 1. Chaque membre de la hiérarchie est caractérisé par deux nombres : son niveau de compétence C dans l'emploi qu'il occupe dans la hiérarchie et son âge A . Le nombre C varie entre 1 et 10, le nombre A entre 18 et 60. Au début de la simulation, on choisit les âges et les niveaux de compétence de chaque agent en opérant un tirage au sort selon une loi normale (la fameuse courbe en cloche) qui imite raisonnablement une répartition réelle.

À chaque étape d'évolution de l'entreprise simulée, l'âge des employés est augmenté d'une unité. Ceux qui ont atteint 60 ans sont éliminés. Sont aussi retirés les employés dont le niveau de compétence est inférieur à 4 (ils sont licenciés). Chaque place ainsi libérée est alors occupée par un employé du niveau en dessous ou par un nouveau venu quand il s'agit du niveau le plus bas. Le niveau de compétence C et l'âge A des nouveaux recrutés sont

L'AUTEUR



Jean-Paul DELAHAYE est professeur à l'Université de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale de Lille (LIFL).

3. Quelques autres Ig Nobel

Les prix Ig Nobel se moquent gentiment de certaines recherches qui, vues du grand public, apparaissent ridicules ou absurdes de par leur sujet ou leurs résultats, comme cela a été le cas pour les conclusions des chercheurs siciliens sur le principe de Peter. Voici quelques exemples de recherches primées.

Chimie 1996 : à G. Goble pour son record du monde d'allumage de barbecue en trois secondes en utilisant de l'oxygène liquide.

Entomologie 1997 : à M. Hostetler pour son livre intitulé « Cette bouillie sur votre voiture », qui permet d'identifier les impacts d'insectes sur les pare-brise d'automobiles.

Paix 1997 : à H. Hillman pour son travail plein d'empathie sur « la douleur éventuellement ressentie durant l'exécution des condamnés à mort par différentes méthodes ».

Ingénierie et sécurité 1998 : à T. Hurtubise pour avoir mis au point et testé personnellement une armure à l'épreuve des grizzlis.

Littérature 1999 : à l'Institut britannique de standardisation pour sa spécification en six pages BS-6008 décrivant la bonne façon de faire une tasse de thé.

Paix 2005 : à C. Rind et P. Simmons pour avoir étudié l'activité cérébrale d'une sauteuse lors d'une projection du film *Star Wars*.

Chimie 2005 : à E. Cussler et B. Gertelinger pour leur étude minutieuse de la question « les gens nagent-ils plus vite dans le sirop ou dans l'eau ? ».

Médecine 2008 : à D. Ariely qui a démontré qu'un placebo cher était plus efficace qu'un placebo au prix modique.

Economie 2008 : à G. Miller, J. Tybur et B. Jordan pour avoir découvert que le cycle d'ovulation d'une danseuse de danse-contact avait un effet sur le total de ses pourboires.

Paix 2009 : à R. Stephens, J. Atkins et A. Kingston qui ont démontré que jurer augmente la tolérance à la douleur.

Santé publique 2009 : à E. Bodnar, R. Lee et S. Marijan pour la mise au point d'un soutien-gorge qui, en cas d'urgence, peut être instantanément converti en une paire de masques à gaz. Notons que les récipiendaires acceptent le prix avec bonne humeur, comme on le voit sur la photographie ci-dessous, assistent souvent à la cérémonie et, fiers de leur originalité, prononcent un discours d'acceptation...



minés comme lors de la constitution de la structure initiale.

Pour déterminer la compétence d'un employé qui monte d'un niveau, deux modèles ont été envisagés. Dans le premier modèle, on suit ce que les auteurs dénomment l'*hypothèse de Peter* : la compétence dans la nouvelle fonction est indépendante de la compétence dans l'ancienne et est déterminée par un tirage aléatoire comme pour les nouveaux recrutés ou comme pour la fixation des compétences dans la hiérarchie au point de départ. Dans le second modèle, on adopte l'*hypothèse de bon sens* : en gravissant un échelon, un employé garde le niveau de compétence qu'il avait auparavant, avec seulement une variation aléatoire d'au plus dix pour cent de la compétence maximale. Trois types différents de promotions ont été simulés et comparés.

– La promotion du meilleur : pour remplir une case vide de la hiérarchie, on choisit, dans le niveau inférieur, l'employé le plus compétent.

– La promotion du pire : pour remplir une case vide de la hiérarchie, on choisit, dans le niveau inférieur, l'employé le moins compétent.

– La promotion au hasard : le promu est choisi en tirant au sort parmi les employés du niveau inférieur.

Bien sûr, à chaque étape d'évolution de la hiérarchie (étape qui simule une durée d'une année), les places libérées par une promotion provoquent une autre promotion, ou un recrutement s'il s'agit du niveau le plus bas, et cela en cascade, jusqu'à ce que tous les postes soient pourvus.

Pour mesurer et comparer les effets des deux hypothèses et des trois méthodes de promotion, on calcule pour chaque étape l'efficacité globale de la hiérarchie à l'aide d'une formule. Celle-ci prend en compte l'efficacité de chaque employé de la hiérarchie, tout en donnant de plus en plus de poids aux employés à mesure qu'ils s'élèvent dans la pyramide : l'importance d'un salarié pour l'efficacité globale de l'entreprise est d'autant plus grande qu'il occupe un poste élevé. Cette mesure d'efficacité globale est normalisée pour varier entre 0 et 100 pour cent, le 0 correspondant à une organisation totalement inefficace, le 100 correspondant au maximum théorique quand tous les employés ont un niveau de compétence maximal.

Le calcul pour les six combinaisons possibles d'hypothèses et de méthodes de promotion a été mené pendant 1 000 étapes (ce qui correspond à une évolution sur 1 000 ans !) On obtient donc (ci-dessous) six courbes. Chaque courbe montre une évo-

lution du niveau général d'efficacité de l'entreprise qui, dans un premier temps, est soit globalement croissant, soit globalement décroissant, puis qui reste approximativement constant, subissant seulement de faibles fluctuations, inévitables puisque les modèles font tous appel à de nombreux éléments aléatoires. Il n'y a pas de surprises notables pour les trois courbes noires correspondant à l'hypothèse qu'une personne promue garde approximativement son niveau de compétence en changeant d'échelon.

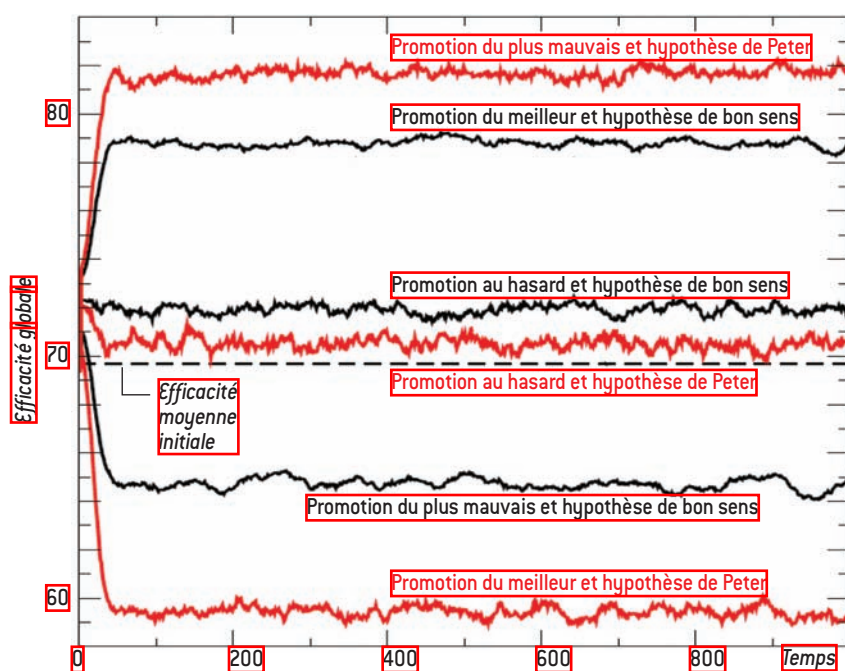
Promouvoir les incompetents ?

La promotion du meilleur est la bonne méthode ; sa compétence se trouve valorisée en montant dans la hiérarchie, où elle contribue de plus en plus à l'efficacité globale. Le tout conduit l'organisation à un haut niveau d'efficacité générale, mesurée à 79 pour cent par la simulation. Toujours sous l'hypothèse de bon sens de la persistance de la compétence quand un employé passe d'un niveau au suivant, la méthode de promotion du pire se révèle très mauvaise : elle conduit à une efficacité de 65 pour cent et donne, sans surprise, un résultat moins bon que la promotion au hasard (efficacité de 72 pour cent).

La surprise vient des courbes rouges explorant l'hypothèse de Peter que la compétence de l'employé promu dans ses nouvelles fonctions n'est pas directement liée à ses compétences à l'échelon précédent. Cette fois, la meilleure méthode de promotion (efficacité globale de 82 pour cent) consiste à choisir le plus incompetent (promotion du pire), meilleure même que la promotion du meilleur sous l'hypothèse d'une conservation de compétence !

Sous l'hypothèse de Peter, la seconde méthode en efficacité consiste à promouvoir au hasard : elle conduit à une efficacité globale aux alentours de 70 pour cent. En dernier, arrive la méthode naturelle de promotion du meilleur, qui fait paradoxalement passer l'efficacité générale de la hiérarchie sous 60 pour cent, le plus mauvais résultat des six calculs opérés !

C'est cette étrangeté qui a sans doute valu aux auteurs des calculs l'attribution du



Ig Nobel, car, bien sûr, aucune entreprise ne va promouvoir les plus mauvais employés ou procéder au hasard !

N'y aurait-il pas une erreur ? A. Pluchino et ses collègues ont vérifié leurs calculs et exploré avec succès toutes sortes de jeux de paramètres de façon à s'assurer de la robustesse de leur modèle. Une étude complémentaire, parue en 2011 et faisant encore varier les paramètres et les structures de la pyramide hiérarchique des organisations simulées, a confirmé les résultats.

A y réfléchir, ces résultats étaient prévisibles, car ils suivent la régression vers la moyenne [qu'assez curieusement les chercheurs italiens ne mentionnent pas]. Si, selon ce qu'ils nomment l'hypothèse de Peter, la compétence après promotion est indépendante de la compétence avant promotion, il est évidemment bénéfique de promouvoir les plus mauvais, qui deviendront meilleurs puisqu'après promotion, ils se rapprocheront de la moyenne.

Le choix des plus mauvais donne à ceux-ci une seconde chance. C'est bon pour eux et c'est bon aussi pour l'efficacité générale. De même, sous l'hypothèse de Peter, promouvoir au hasard est meilleur que promouvoir les meilleurs qui, quand ils sont promus, régressent dans leur ensemble vers la moyenne, faisant reculer l'efficacité globale. Promouvoir les meilleurs dans le cas de l'hypothèse de Peter est la pire chose à faire, il n'y a aucun paradoxe à cela et le principe de Peter est bien vrai.

Le cliquet

Avec les dés que l'on relance jusqu'à ce que tous donnent 1, il n'y a pas de régression vers la moyenne, mais uniquement un effet de cliquet. Comme dans une horloge où le dispositif mécanique du cliquet force les roues à tourner dans un sens et pas dans le sens inverse, dans l'exemple des dés, ne pas relancer les dés tombés sur 1 augmente jusqu'à 1 la proportion des dés donnant 1.

Dans le principe de Peter énoncé sous la forme « tout employé finit pas arriver à son niveau d'incompétence », deux mécanismes jouent : d'une part, la baisse d'ef-

ficacité moyenne d'une personne promue en interne et au mérite qui s'explique par la régression vers la moyenne, d'autre part, l'accumulation des incompetents dans la structure hiérarchique au cours du temps, due au mécanisme de cliquet.

Les organisations qui déterminent les promotions uniquement au mérite, cas des très grandes administrations, sont victimes de la régression vers la moyenne qui tend à produire de l'incompétence. Les organisations mieux dirigées, tout en n'oubliant pas l'intérêt stimulant de la promotion au mérite, contrôlent qu'on ne demande pas au promu de faire ce qu'il ne sait pas faire.

La seconde leçon est qu'il faut contrer le mécanisme de cliquet, ce qui est facile, par exemple en changeant rapidement les fonctions des incompetents ou en s'en débarrassant...

Le hasard social

L'affirmation que le hasard peut être utile pour prendre des décisions collectives s'applique aussi à la vie politique et à la justice et a été pratiquée depuis l'Antiquité. Le *Kleroterion*, dispositif utilisé dans la période de démocratie de la Grèce antique pour choisir des juges et fixer certaines responsabilités politiques, procédait avec des lancers de billes.

Aujourd'hui, dans de nombreux pays, les jurés des grands procès sont choisis au hasard, et il n'est pas absurde de soutenir qu'il faut faire jouer au hasard un rôle plus grand dans le choix des responsables de l'exécutif politique. Cela éviterait que le pouvoir ne soit accaparé par une classe politique inamovible de gens représentant assez mal l'intérêt collectif et d'accord entre eux pour éviter les réformes opposées à leurs intérêts. Après la Grèce antique et la République de Venise, où une sorte de loto déterminait les membres du Sénat, un exemple contemporain de l'introduction délibérée de hasard dans les mécanismes de choix politique s'est produit en Ontario, au Canada, où, en 2007, l'Assemblée des citoyens a été constituée par tirage au sort et chargée de réfléchir à une réforme électorale...

BIBLIOGRAPHIE

Ph. Boulanger, **Il n'y a pas moyen de moyenniser**, *Dossier Pour la Science*, n° 59, 2008.

A. Pluchino *et al.*, **Efficient promotion strategies in hierarchical organizations**, 2011 : <http://arxiv.org/pdf/1102.2837>

A. Pluchino *et al.*, **The Peter Principle revisited: A computational study**, *Physica A*, vol. 389, pp. 467-472, 2010.

P. Sobkowicz, **Dilbert-Peter model of organization effectiveness: computer simulations**, *J. of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 13(4), 4, 2010.

M. Sabatier, **Promotion and productivity in French academia: A test of the Peter Principle**, Université de Savoie, Institut de recherche et gestion en économie, 2009 (www.irege.univ-savoie.fr/admin/files/publi/contenu/131122907_peter-principle.pdf).

D. Dickinson et M. Villeval, **The Peter principle: an experiment**, Groupe d'analyse et de théorie économique, UMR CNRS 5824, 2007 (<http://hal.inria.fr/docs/00/20/12/25/PDF/0728.pdf>).

E. Lazear, **The Peter principle: A theory of decline**, *Journal of Political Economy*, vol. 112(1), pp. 141-163, 2001.

L. Peter et R. Hull, **The Peter Principle: Why Things Always Go Wrong**, William Morrow & Company, 1969.

ART & SCIENCE

Pollock et la dynamique des fluides

Jackson Pollock faisait couler de la peinture à partir de bâtons qu'il trempait dans des pots. Il devenait donc tributaire des lois de la dynamique des fluides, notamment celles qui expliquent le comportement de liquides soumis à la gravité.

Loïc MANGIN

Les artistes sont parfois confrontés aux phénomènes naturels, régis par les lois de la physique. On distingue alors plusieurs types de relations. Prenons l'exemple des écoulements. Léonard de Vinci, à travers diverses études, a essayé de comprendre les mouvements des fluides et notamment les turbulences. Beaucoup de peintres ont représenté des vagues, le ruissellement d'un torrent... mais rares sont ceux qui ont réussi à les rendre de façon réaliste. Ces événements relevant de la dynamique des fluides sont particulièrement rétifs au pinceau.

Les liens entre cette discipline de la physique et l'art ne se cantonnent pas à cette difficulté de représentation et prennent parfois des chemins inattendus. Ainsi, les outils de l'analyse des mouvements des fluides se révèlent pertinents pour explorer les œuvres de certains artistes. C'est à cet exercice que se sont livrés Andrzej Herczyński et Claude Cernushi, du *Boston College*, aux États-Unis, avec L. Mahadevan, de l'Université Harvard, à Cambridge. Ils se sont penchés sur les peintures de l'Américain Jackson Pollock (1912-1956).

Dans les années 1940, l'artiste investit une vieille, mais immense grange, à Long Island, où il sera à même de se lancer dans les très grands formats. Pour ce faire, les toiles, de plusieurs mètres carrés de surface, sont posées sur le sol. Pollock abandonne également les pinceaux et développe une nouvelle technique : il plonge un bâton

dans un pot de peinture et, après l'en avoir retiré rapidement, il laisse la peinture couler sur la toile en même temps qu'il déplace le bâton. Les toiles étaient donc recouvertes d'un entrelacs de coulures de peinture, des lignes continues, sinueuses et ondulées, *Convergence* en étant une illustration (voir la figure a).

Le peintre bouleversa ainsi les canons esthétiques de l'art d'une façon particulièrement intrigante pour les physiciens, puis-

Pollock bouleversa les règles de l'art, mais il ne pouvait s'affranchir des lois de la physique.

qu'il partageait la responsabilité de l'œuvre avec les phénomènes naturels de la dynamique des fluides, coauteurs involontaires... A. Herczyński et ses collègues ont voulu savoir quelle part revenait au peintre en analysant la technique de Pollock sur des œuvres effectuées entre 1940 et 1950.

Commençons par le procédé de collecte et de dispersion de la peinture. Quelle quantité de peinture retire-t-on avec le bâton ? Pour un bâton cylindrique de rayon r_0 , elle est proportionnelle à l'épaisseur h de peinture qui y adhère (voir la figure b). Ce

paramètre dépend de plusieurs facteurs, notamment de la densité ρ , de la viscosité μ et de la vitesse u_0 avec laquelle le bâton est tiré du pot. On calcule que h vaut approximativement $\sqrt{\nu u_0 / g}$, ν étant la viscosité dite cinématique de la peinture (μ/ρ) et g , l'accélération de la pesanteur. Dans le cas le plus simple, quand le bâton est retiré verticalement, le volume V de peinture extrait est de l'ordre de $r_0 L h$, L étant la longueur du bâton enduite.

Une fois le bâton hors du pot, un jet se forme sous l'effet de la gravité dont le débit Q s'exprime ainsi : $r_0 u_0^{3/2} \sqrt{\nu/g}$. On en déduit que plus on extirpe vite le bâton, plus le film de peinture est épais et plus le débit Q est rapide. En outre, la dépendance de Q vis-à-vis de la viscosité cinématique indique qu'une augmentation de la viscosité améliore le débit, car la quantité de liquide est alors supérieure. Pollock, en tâtonnant, a sans doute perçu ce lien. De fait, on sait qu'il ajustait la viscosité grâce à de l'eau et à des solvants et qu'il testait ses mélanges. Une fois le jet entamé, il pouvait le contrôler en agitant le bâton latéralement, ou de haut en bas, de quelques centimètres à un mètre au-dessus de la toile. Plusieurs photos et films le montrent ajustant le flux de peinture.

On observe dans plusieurs œuvres de Pollock des motifs oscillants (voir l'agrandissement, figure c). Ces traces résultent d'une instabilité du jet qui se traduit par un enroulement du filet de peinture (similaire à l'in-

Regards

stabilité du tuyau d'arrosage], ce mouvement étant superposé à un déplacement du bâton. Dans ces conditions, la forme de la trace dépend d'un paramètre (sans dimension) dit nombre de Strouhal (noté St), lié à la vitesse angulaire de l'enroulement.

Quand St est égal à 0, la trace est circulaire, il n'y a pas de mouvement latéral. Quand St augmente, la trace ressemble à une série de boucles qui se chevauchent jusqu'à ce que St soit égal à 1, la trace étant

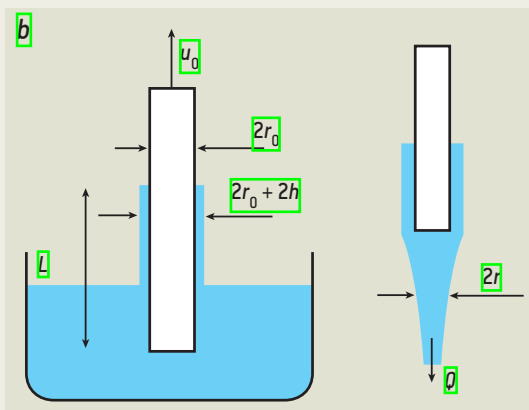
alors une courbe ponctuée de pointes. Cette courbe devient ensuite une sinusoïde, voire une droite quand la vitesse de déplacement du bâton est élevée. Ces divers types de motifs (boucles, pointes et sinusoïdes) sont visibles. En les observant, on peut en déduire les variations de vitesse du bras de Pollock. Notamment, il freinait quand il tournait, pour repartir dans l'autre sens.

En rompant avec les techniques classiques, Pollock bouleversa les règles de

l'art, mais il ne pouvait s'affranchir des lois de la physique. Néanmoins, l'analyse de sa technique montre qu'il maîtrisait, de façon intuitive, celles qui gouvernent la chute des liquides sous l'effet de la gravité.

A. Herczyński, Cl. Cernuschi et L. Mahadevan, *Painting with drops, jets, and sheets*, *Physics Today*, pp. 31-36, 2011.

R. Taylor, *Attraction fractale*, *Pour la Science*, n° 305, pp. 104-105, mars 2003.



IDÉES DE PHYSIQUE

Des cerfs-volants dans le vent

Pourquoi est-ce un jeu d'enfant de faire voler un cerf-volant ?

Parce que cet objet éolien se stabilise sans contrôle actif de la part du pilote.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Maintenir en vol un avion à moteur ou un planeur nécessite un long apprentissage, afin de maîtriser les commandes et d'assurer la stabilité de l'engin. En revanche, une fois en l'air, un cerf-volant peut y rester sans aucun contrôle ou presque. Cette simplicité du pilotage fait l'intérêt du cerf-volant qui, loin de se limiter aux jeux de plage, va jusqu'à des projets de récupération de l'énergie éolienne.

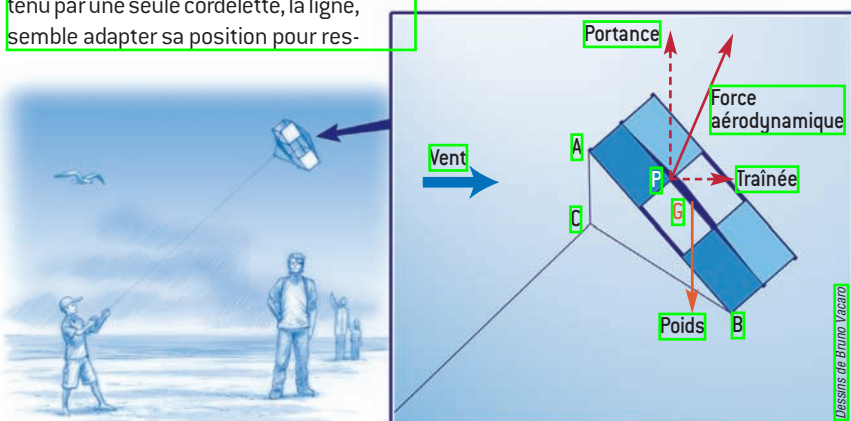
Il ne tient qu'à un fil...

Soulever un homme à des fins d'observation, notamment militaire, comme les Chinois l'ont fait pendant la période impériale, maintenir en l'air une antenne radio, remplacer les voiles d'une planche à voile et faire du kitesurf, etc. : le cerf-volant a servi à des applications variées. La clef de son succès ? Même le modèle le plus simple, tenu par une seule cordelette, la ligne, semble adapter sa position pour res-

ter en sustentation malgré les variations du vent. Comment expliquer ce comportement ?

Commençons par faire le bilan des forces (voir la figure 1) : outre le poids, vertical, qui s'exerce au centre de masse, s'ajoutent la tension de la ligne et la force aérodynamique due au vent apparent. On peut décomposer la force aérodynamique en deux : la portance, perpendiculaire à la direction du vent, et la traînée, de même sens que le vent.

La difficulté de l'analyse tient à deux faits. D'une part, la force aérodynamique et son point d'application, le centre de poussée, dépendent crucialement de l'angle d'attaque – l'inclinaison du cerf-volant par rapport au vent. D'autre part, le cerf-volant est fixé à la ligne en un point d'attache C par une bride courant de son extrémité avant A à l'extrémité arrière B. Par conséquent, il est susceptible de pivoter autour du point C, donc de modifier son angle d'attaque si la bride est tendue.

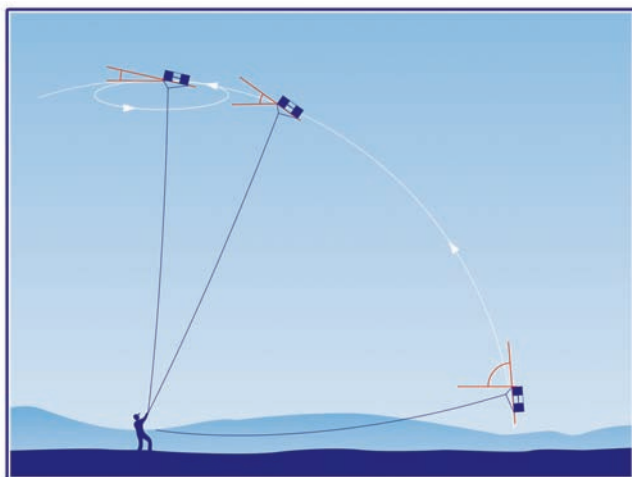


1. LE VENT EXERCE SUR LE CERF-VOLANT une force aérodynamique qui prend appui en un point P situé à l'avant du centre de masse G. Ainsi, lorsque la portance est supérieure au poids, l'angle d'attaque du cerf-volant tend à augmenter : il peut décoller sans décrocher et piquer du nez.

Comment le cerf-volant trouve-t-il son équilibre ? Supposons pour simplifier qu'il soit face au vent, sans inclinaison latérale (son axe transversal est horizontal). Il faut d'abord s'assurer que le cerf-volant « prenne le vent » : laissé à lui-même sans être tenu, son angle d'attaque doit spontanément augmenter. Sinon, il piquera du nez et s'écrasera au sol. Cela implique que le centre de poussée du vent soit toujours à l'avant du centre de masse du cerf-volant sur l'axe AB ; ainsi, lorsque la portance dépasse le poids, condition nécessaire au décollage, l'objet s'incline bien vers le haut. C'est pour cette raison que, en sus du réglage de la position de l'attache C de la bride sur la ligne, on ajoute parfois une queue qui déplace le centre de masse du cerf-volant vers l'arrière.

Si le cerf-volant prend bien le vent, la bride est toujours tendue. Pour analyser l'angle d'attaque, plaçons-nous au point C : par rapport à ce point, les seuls couples qui s'exercent sont ceux du poids et de la force aérodynamique. Si le cerf-volant est à l'équilibre, ces couples sont égaux et, dans un fonctionnement normal, il y a stabilité : grossièrement (en toute rigueur, il faudrait aussi tenir compte des modifications des bras de levier et du déplacement du centre de poussée), lorsque l'angle d'attaque diminue, la portance diminue plus que la traînée et le couple résultant ramène le cerf-volant vers son inclinaison initiale.

Un cerf-volant peut tourner sur lui-même selon d'autres directions et la stabilité selon ces dernières doit aussi être assurée. Pour les mouvements de lacet (déviations dans le plan horizontal), il suffit que le point de poussée soit en arrière du point d'at-



2. QUAND L'ALTITUDE AUGMENTE, le vent se renforce, ce qui devrait accroître la portance du cerf-volant. Mais à mesure que le cerf-volant monte, son angle d'attaque (*en rouge*) diminue, ce qui contrecarre l'effet du renforcement du vent. L'équilibre est ainsi atteint à une certaine altitude. Au-delà, des instabilités font faire au cerf-volant des allers et retours.



3. EN CONTRÔLANT UNE VOILE DE KITESURF de façon qu'elle suive une trajectoire en forme de 8 horizontal, le câble qui la retient est soumis à des tensions variables. Le déroulement du câble lorsque la tension est forte et son enroulement lorsqu'elle est faible permettent, en le couplant à un alternateur et à un moteur, de produire de l'électricité.

tache C : le couple de la force de traînée ramène alors le cerf-volant face au vent.

Pour éviter le roulis (pivotement de l'axe transversal du cerf-volant autour de son axe longitudinal), on construit souvent le cerf-volant avec un léger angle entre les voilures de part et d'autre de l'axe AB. Pour en comprendre l'effet, imaginons une feuille de papier pliée en deux de façon que les deux moitiés forment un dièdre ouvert (un V aplati), et supposons que la feuille puisse tourner autour du pli disposé verticalement. La position d'équilibre de cette feuille face au vent correspond au V pointant contre le vent. Si la feuille tourne légèrement autour du pli, l'un des côtés de la feuille aura plus de prise au vent que l'autre, ce qui crée un couple ramenant la feuille dans sa position initiale. Pour le cerf-volant, le « pli » – l'axe AB – n'est pas vertical, mais il est suffisamment incliné pour que l'effet soit conservé.

Cela dit, il reste à faire s'élever le cerf-volant ! Ce n'est guère évident, car la vitesse du vent est plus faible au niveau du sol qu'en altitude, et la force aérodynamique croît comme le carré de cette vitesse. Par conséquent, lors du décollage, il faut souvent un angle d'attaque élevé, qui procure une plus forte portance qu'un angle faible. Mais si l'angle d'attaque est trop important, l'écoulement de l'air devient turbulent ; la

portance diminue brutalement et provoque le décrochage du cerf-volant. Il faut donc une vitesse minimale du vent au sol pour obtenir une portance supérieure au poids avant le décrochage. Si tel n'est pas le cas, on peut courir contre le vent afin d'augmenter le vent apparent.

Un compromis entre vent et angle d'attaque

Une fois que le cerf-volant a commencé à s'élever, la phase d'ascension est plus facile ; on profite en effet de l'augmentation du vent, donc de la portance, avec l'altitude. Mais à mesure que le cerf-volant s'élève, son angle d'attaque diminue, et la portance avec, ce qui permet d'atteindre l'équilibre à une certaine altitude (voir la figure 2). En fait, les calculs montrent que plusieurs altitudes d'équilibre sont possibles (il faut aussi tenir compte de la masse de la ligne et du fait que son profil n'est pas une droite, mais une courbe).

Avec deux lignes au lieu d'une, on peut faire exécuter des acrobaties au cerf-volant. En tirant plus sur une ligne que sur l'autre, le pilote le fait pivoter selon un axe perpendiculaire à son plan. La portance a alors une composante latérale qui déporte le cerf-volant sur le côté, prélude à des mouvements

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

✓ SUR LE WEB

Simulateur de cerf-volant : <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/kiteprog.html>



Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

BIBLIOGRAPHIE

G. Sánchez, **Dynamics and control of single-line kites**, *Aeronautical Journal*, vol. 110, n° 1111, pp. 615-621, 2006 (www.raes.org.uk/pdfs/3048.pdf).

J. Breukels et W. J. Ockels, **Past, present and future of kites and energy generation**, Power and Energy Systems Conference 2007, Clearwater, FL, USA, 3-5 janvier 2007 (www.kitepower.eu/images/stories/publications/breukels07a.pdf).

plus ou moins élaborés. Il est envisageable d'obtenir des mouvements circulaires, mais cela enroule les deux fils. Il vaut donc mieux effectuer des figures en forme de 8 horizontal (voir la figure 3), qui dessinent le symbole de l'infini dans le ciel.

Le pilotage des cerfs-volants ouvre la voie à des applications de plus en plus audacieuses. Ne peut-on pas étendre le principe du kitesurf à la traction des bateaux ? Les avantages du cerf-volant sont nombreux. Une même surface de voile, pilotée de façon dynamique, peut fournir une force de traction jusqu'à 25 fois supérieure à celle d'une voile de bateau. Le vent apparent, résultante du vent réel et de la vitesse du cerf-volant, est plus fort que le vent réel, la force de portance est donc considérablement augmentée. En outre, en volant à une altitude de 150 à 200 mètres au-dessus de la mer,

le cerf-volant se trouve dans un régime de vent plus intense et beaucoup moins turbulent qu'au sol.

Une autre idée est de récupérer de l'énergie à l'aide d'un cerf-volant. Il suffit de réaliser un mouvement qui alterne des phases où la tension des lignes est forte (en altitude, là où le vent est important) avec des phases où cette tension est plus faible (plus près du sol). Dans ce cas, si la ligne est reliée à un enrouleur solidaire d'un moteur-alternateur, il suffit d'enrouler le câble lorsque la tension est faible en fonctionnant en moteur et de le dérouler, en convertissant l'énergie en électricité, lorsque la tension est importante. Un prototype de l'Université de Delft a ainsi fonctionné en 2010 avec une voile de kitesurf de 50 mètres carrés, en fournissant jusqu'à 20 kilowatts d'électricité. ■

XIX^{es} OLYMPIADES DE PHYSIQUE FRANCE

QUAND LES LYCÉENS DEVIENNENT CHERCHEURS

Inscrivez-vous sur www.odpf.org



POURQUOI PAS VOUS ?

Organisées par :

udppc 

Union des Professeurs de Physique et de Chimie



Les inscriptions à l'édition 2011/2012 des Olympiades de Physique France sont ouvertes

Vous encadrez ou avez encadré pour un TPE ou un Atelier scientifique un groupe de lycéens motivés et enthousiastes, **poursuivez l'aventure en inscrivant cette équipe aux XIX^e Olympiades de Physique France.**

Cette participation permettra à vos élèves de mettre en valeur leur travail et de partager leur intérêt avec d'autres passionnés de sciences et de physique.

Les Olympiades sont aussi l'occasion de promouvoir les sciences expérimentales dans votre établissement et auprès des nouveaux lycéens.

Informations et inscriptions :
<http://www.odpf.org>

Cloture des inscriptions : **30 octobre 2011**

Sélections régionales : **7 décembre 2011**

Finale et exposition des projets au Palais de la Découverte : **27-28 janvier 2012**

Les Olympiades de Physique France sont organisées par l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie et la Société Française de Physique.

udppc



SCIENCE & GASTRONOMIE

Dépistons les odeurs

Pour extraire des composés odorants, l'évaporation sous pression réduite fait son entrée dans les cuisines professionnelles.

Hervé THIS



En montagne, l'eau bout à moins de 100 °C : une montagne est ainsi une « anticocotte-minute » où, la pression atmosphérique étant réduite, la température d'ébullition de l'eau est abaissée. Les chimistes ont appris à créer des montagnes plus hautes que l'Everest (où l'eau bout à 68 °C) dans leurs laboratoires : leurs systèmes d'évaporation sous pression réduite permettent de faire bouillir des solutions à la température ambiante. Avec de tels systèmes, les chimistes séparent par distillation des produits qui se décomposeraient à la température de 100 °C.

Or la cuisine a notamment pour objectif de récupérer les odeurs délectables (dues souvent à des molécules fragiles), et les cuisiniers les plus modernes s'équipent de tels systèmes d'évaporation sous pression réduite.

Le plus souvent, ces systèmes sont composés d'un bain-marie, d'un ballon où l'on place la matière à évaporer (on le fait tourner pour régulariser l'ébullition éventuelle), d'un réfrigérant qui condense les vapeurs, d'un ballon pour leur réception (parfois, il est refroidi, afin de bien les récupérer) et enfin d'une pompe pour abaisser la pression dans l'ensemble du système.

Certains cuisiniers utilisent cette nouvelle technique pour séparer les produits odorants du café, des framboises, de la viande, du bouillon... Ils font usage à la fois de la partie évaporée, récupérée dans le ballon refroidi (« piège froid ») où les vapeurs sont condensées, et de la partie de « résidu », terme péjoratif, mais qui désigne des produits concentrés parfois intéressants (l'eau qui fait l'essentiel des aliments ayant été éliminée).

Ainsi, à Vevey, en Suisse, le chef Denis Martin traite de la terre rouge (des grès contenant des oxydes de fer) avec des champignons de Paris afin d'obtenir une fraction odorante qu'il nomme « Humus ». Il donne à sentir cette fraction pendant que les convives mangent un plat croquant (friture d'anchois, sauce poivrée, tempura de sauge, réduction de citronnelle, pommes vertes), l'idée étant d'évoquer l'odeur d'un sous-bois et le bruit que l'on fait en marchant dans les bois (feuilles mortes et branches cassées)...

Toutefois, malgré des systèmes de séparation plus efficaces que l'évaporation sous pression réduite, telles la chromatographie en phase gazeuse et la spectrométrie de masse, les composés odorants de la plupart des fruits restent soit méconnus, soit un secret industriel.

Les seuls fruits un peu connus sont la fraise et quelques autres fruits d'importance commerciale (notamment parce qu'ils sont employés pour les yaourts), et encore : la technique d'analyse qui consiste à placer dans l'air qui surmonte un fruit (broyé ou non) une fibre sur laquelle les composés odorants s'adsorbent n'est pas sans écueil : la présence de lipides gêne l'adsorption des molécules odorantes d'intérêt et, surtout, les vitesses d'adsorption diffèrent selon les produits, les déterminations des proportions des divers composés sont faussées.

Pour couronner le tout, l'odeur de « la » fraise n'existe pas, puisque chaque fraise a son odeur propre. Bien sûr, des composés sont, pour des raisons génétiques et physiologiques, présents dans toutes les fraises, et l'on a ainsi identifié une quinzaine de composés essen-

tiels pour l'odeur de fraise, mais leurs proportions changent selon les fruits, les variétés, les conditions de culture, les sols, les climats... Or l'odeur résulte non pas de la liste des composés, mais de leurs proportions.

Pour les mûres, 49 composés au moins sont importants pour les odeurs..., contre 235 pour les framboises ! D'ailleurs, comment justifier l'exploration scientifique de l'odeur des petits fruits, alors que les systèmes scientifiques réclament des programmes bien cadrés ? Faut-il vraiment que des agents de l'État aillent explorer une à une les diverses variétés, aux divers stades de maturité, dans les diverses conditions de culture, de récolte, etc. ? On comprend que l'industrie des composés odorants soit l'essentielle détentrice des connaissances dans le domaine... et que reste « inconnue » la composition en composés odorants de la myrtille, du cassis, de la groseille...

Du coup, comment les cuisiniers pourront-ils connaître la nature des composés qu'ils séparent par évaporation à pression réduite ? La réponse est simple : ils s'en moquent et se contentent de goûter les produits qu'ils préparent. Il y a des cas où le nœud gordien doit être tranché !



Hervé This est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire [Académie des sciences].



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr

→ ARCHÉOLOGIE

Halte au pillage !

Sous la direction
de G. Compagnon,
Errance, 2011
[446 pages, 32 euros].

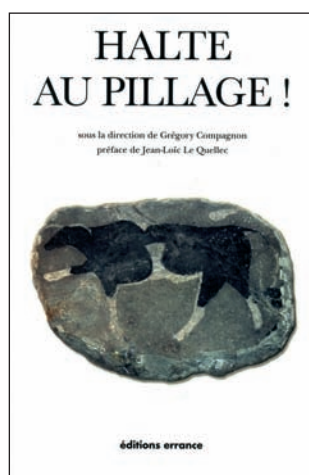
Cet ouvrage collectif, dirigé par Grégory Compagnon, président de l'Association *Halte au pillage du patrimoine archéologique et historique* (HAPPAH), fait le point sur le pillage des ressources archéologiques. Parce qu'il est doté de moyens considérables, ce phénomène mondial est à l'origine de fortunes tout aussi considérables. Il a pris depuis le milieu du XX^e siècle une ampleur sans précédent. Fouilles clandestines, usage illégal des détecteurs de métaux, trafic mondialisé des antiquités, etc., ont entraîné la disparition de pans entiers du patrimoine de l'humanité.

En France, au Cameroun, dans le Sahara, en Polynésie ou en Alaska, l'archéologue, une fois disparus les « beaux » objets, se retrouve ainsi comme devant un livre d'histoire de l'art dont toutes les illustrations auraient été découpées et dispersées. Les communications réunies dans ce livre utile et dense montrent qu'il existe une géographie du pillage, parée d'une inégalité flagrante puisque ce phénomène atteint surtout les pays les plus pauvres.

L'archéologie est en effet bien différente aujourd'hui du pillage : elle étudie l'objet en tant que source informative dans son contexte, révélant ainsi les héritages du passé, sans se contenter d'accumuler les objets pour eux-mêmes, en de stériles collections.

Le pillage s'inscrit dans un processus historique. Ses premières manifestations remontent peut-être à l'âge du bronze, avec le viol de tombes, en Asie cen-

trale, dans le but d'y récupérer des objets en métal précieux. En Europe, le phénomène connaît un essor notable au cours des XVIII^e et XIX^e siècles ; il aboutit au milieu du XX^e siècle à la séparation entre les archéologues scientifiques, d'une part, et les collectionneurs amateurs d'art aux pratiques de plus en plus illégales, d'autre part.



Aux côtés d'archéologues amateurs autodéclarés, il existe à travers le monde d'authentiques professionnels du pillage : *tombatori* italiens, *huaqueros* péruviens, *esteleros* guatémaltèques, *clandestini* siciliens... Les sommes en jeu sont considérables, d'autant plus quand les populations environnantes sont démunies ; elles ne recevront de toute façon guère plus de deux pour cent de la valeur réalisée.

En Europe, des nuances se dessinent entre l'Ouest et l'Est, en fonction des niveaux de vie et de l'organisation souterraine du marché parallèle des objets archéologiques. Les grottes et leurs fossiles, les ruines antiques, les champs de bataille et jusqu'aux restes des soldats tombés au combat, tous protégés par la loi, y sont la cible de plus en plus fréquente de pillleurs dont la recrudescence pourrait

trouver son origine dans le déclin récent de l'archéologie bénévole. L'arme par excellence des pillleurs européens est le détecteur de métaux, véritable fléau du patrimoine archéologique depuis les années 1960.

La situation internationale est plus préoccupante encore. Dans certaines parties des Amériques, comme au Pérou, plus de 90 pour cent du patrimoine ont disparu du fait des pillleurs. La mise en place d'outils pertinents, comme les systèmes d'information géographiques, permet aujourd'hui d'informer les décideurs sur cette activité illégale et les réseaux qui la dirigent. Dans d'autres régions du globe, en Afrique, en Polynésie, le pillage est pour ainsi dire institutionnalisé depuis l'ère coloniale, l'essor du tourisme, au XX^e siècle, n'ayant fait qu'aggraver les choses.

Quelques solutions s'esquissent, dans ce contexte pessimiste, grâce d'abord à l'action du législateur. L'appareil législatif constitue en effet la première, sinon la seule, réponse adaptée des sociétés au fléau du pillage. Il est aujourd'hui le produit d'une évolution remarquable, depuis la Convention de La Haye (1954) jusqu'à celles de 1992 et 2001. Toutefois, les situations comme les modalités d'application de la loi restent fort inégales d'un continent et d'un pays à l'autre. Pour autant, la recherche d'un consensus entre archéologues scientifiques et pillleurs-collectionneurs achoppe inévitablement sur la valeur exceptionnelle reconnue à certains objets, au détriment de leur contexte tout entier. Le pillage du passé de l'humanité se poursuit donc, sur un rythme inquiétant.

→ Vincent Carpentier
INRAP, Basse-Normandie

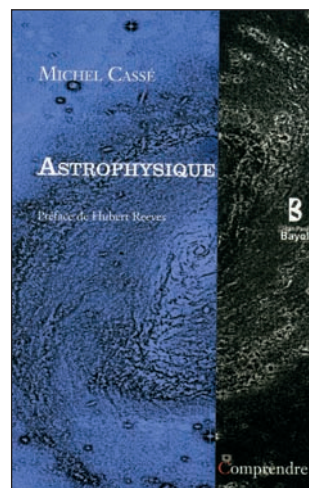
→ ASTROPHYSIQUE

Astrophysique

Michel Cassé
Jean-Paul Bayol, 2011
[112 pages, 12 euros].

Comprendre l'origine de l'Univers et son évolution change notre vision de la nature et de la société. Fort de cette certitude, l'astrophysicien Michel Cassé, du CEA, fait le point sur les connaissances actuelles et les problématiques qu'elles engendrent avec un lyrisme et une sensibilité qui lui sont propres.

Préfacé par Hubert Reeves, l'ouvrage s'ouvre sur la physique des particules, aspect essentiel pour comprendre l'astrophysique des hautes énergies à l'œuvre dans les étoiles, dans les quasars ou les noyaux actifs des galaxies... Puis c'est l'Univers et sa genèse qui sont examinés. Est-il fini ou infini ? Est-il statique, courbe ou plat ? A-t-il eu un commencement ? Avec pédagogie, l'auteur nous fait toucher du doigt la nécessité de concilier la relativité générale et la théorie quantique sur lesquelles reposent les modèles d'univers. Puis il aborde les grandes théories unificatrices, telles la théorie des cordes et la



gravité quantique à boucles, qui tiennent le haut du pavé.

Quand, ensuite, Michel Cassé aborde le Big Bang, c'est pour se demander le pourquoi d'un événement aussi particulier. Hasard ou nécessité? Et pourquoi existons-nous? La plupart des théories de la gravitation quantique prévoient l'existence d'univers multiples, multivers ou plurivers, tous également cohérents et légitimes. Selon l'auteur, le concept de plurivers fournirait des réponses nouvelles au problème de la genèse, en banalisant le Big Bang. Notre Univers ne serait qu'une bulle parmi d'autres, dans une sorte de champagne cosmique où la création serait permanente, multiple et aléatoire.

→ Marie-Christine de La Souchère
Agrégee de physique

→ HISTOIRE DES SCIENCES

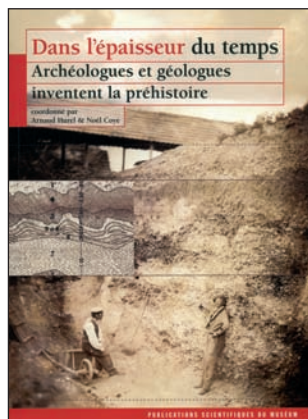
Dans l'épaisseur du temps

Coordonné par Arnaud Hurel et Noël Coye

Publications scientifiques du Muséum, 2011
(442 pages, 35 euros).

Comment légitimer une nouvelle science? C'est ce que montre cet ouvrage qui nous ramène à l'aube de l'archéologie préhistorique.

C'est en 1859, alors qu'à Paris se fonde la Société d'anthropologie et qu'à Londres Darwin publie *L'Origine des espèces*, que sortent des alluvions de la Somme les preuves que l'homme et des espèces animales disparues furent contemporains. Figure centrale de cette histoire et de ce volume, Boucher de Perthes est ici replacé à la fois dans une lignée intellectuelle et parmi les acteurs et les institu-



tions clefs du débat dans sa complexité. C'est autour de la controverse sur l'authenticité de la mâchoire de Moulin-Quignon, qui engage les prestiges nationaux de la France et de l'Angleterre, que s'observe l'élaboration d'un programme scientifique et d'une séparation de la préhistoire d'avec la géologie. Basée sur la stratigraphie et construite comme un projet d'archéo-géologie, la préhistoire en France restera cependant avant tout anthropologique.

Les 15 auteurs s'efforcent de montrer comment, chez les fondateurs de cette discipline, se modifie le rapport au temps et à la durée. Les préhistoriens se saisissent du temps, ils le laïcisent, mais surtout ils parviennent à comprendre la longue durée à la fois comme échelle et comme agent causal. Les conceptions de Boucher de Perthes, parfois métaphysiques dans son attention aux « pierres-figures », inscrivent le temps dans une succession d'époques et de ruptures au cours desquelles les populations se remplacent. Si pour certains se pose le scandale logique d'une humanité antérieure à l'humanité, c'est bien cette évolution qui permet de repenser les origines de l'homme.

L'année 1859 est donc à la fois un point de rupture épistémologique majeure et l'aboutissement

de tout un processus. Dédié à l'historien des sciences Goulven Laurent (1925-2008), cet ouvrage représente une synthèse sur ce tournant, dont l'étude s'impose à tous ceux qui s'intéressent de près à l'histoire de la préhistoire.

→ Josquin Debaz
EHESS

→ PROSPECTIVE

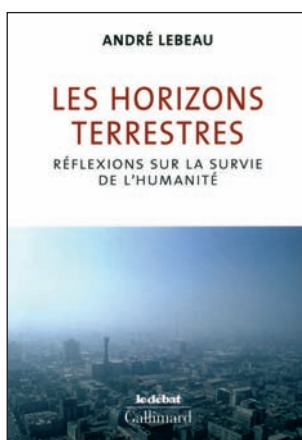
Les horizons terrestres

André Lebeau

Gallimard, 2011
(264 pages, 17,90 euros).

Dans la continuité de ses deux précédents livres : *L'Engrenage Technique* (2005) et *L'Enfermement Planétaire* (2008), André Lebeau poursuit sa réflexion sur les conditions de survie de l'humanité.

L'analyse est d'abord éthique et permet de souligner la contradiction majeure de nos sociétés : la finitude de la planète s'oppo-



se par essence à la volonté communément partagée de construire une société pérenne avec une économie fondée sur la croissance. Le partage des ressources (eau, énergies fossiles, sol, nourriture) pose la question des inégalités et

Brèves

LA DOMINATION FÉMININE

Vincent Dussol

J.-C. Gawsewitch, 2011
(406 pages, 22,90 euros).



Extraordinaire titre et livre ! Enracinée dans le biologique, la domination féminine dont parle l'auteur coexiste avec la domination masculine, tout en étant difficile à percevoir. Pour la rendre palpable, il convoque la génétique, la mythologie, l'anthropologie ou encore la psychanalyse. Et démontre que la fabrique de l'être humain masculin diffère de celle de l'être humain féminin au moins en ceci qu'elle ne peut qu'être solidement biologique, puisque les hommes sont des « femmes modifiées ».

SYMÉTRIE ET PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES CRISTAUX

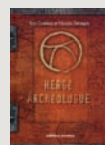


C. Malgrange et al.
EDP Sciences/CNRS
Éditions, 2011
(494 pages, 52 euros).

Les symétries des cristaux sont un important chapitre de la physique souvent présenté de façon simpliste dans les manuels. Avec celui-ci, l'étudiant et le chercheur rigoureux pourront assouvir leur soif de bien comprendre les fondements de la cristallographie.

HERGÉ ARCHÉOLOGUE

E. Crubézy et N. Sénégas
Errance, 2011
(218 pages, 25 euros).



Les auteurs, tous les deux anthropologues, l'un en plus illustrateur et photographe, revisitent les récits archéologiques contenus dans les albums de Tintin pour réfléchir à de nombreux aspects de l'archéologie, notamment à son évolution depuis 1950. Tant la clarté des textes que les illustrations de ce petit livre rendent cette occasion de faire de l'histoire et de l'épistémologie de l'archéologie aussi agréable que formatrice.

Brèves



HELMHOLTZ DU SON À LA MUSIQUE

P. Bailhache, A. Soulez
et C. Vautrin
Vrin, 2011
(256 pages, 28 euros).

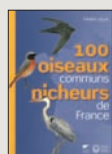
Avec le physiologiste Hermann von Helmholtz (1821-1894), la théorie de la musique repose désormais sur une science expérimentale et non plus sur des rapports mystérieux entre des nombres. Autour de trois textes clefs, deux philosophes et un historien des sciences évoquent ce tournant et sa réception dans les milieux musicaux et philosophiques, au cours de la vie de Helmholtz et aujourd'hui.

À LA DÉCOUVERTE DU CIEL

Emmanuel Baudoin
Dunod, 2011
(192 pages, 15,90 euros).



Astronomes débutants, ce guide pratique et illustré de l'observation du ciel est pour vous. Une présentation claire et didactique des instruments de l'astronome est suivie par le portrait d'une sélection d'objets célestes, du Système solaire aux constellations.



100 OISEAUX COMMUNS NICHEURS DE FRANCE

Frédéric Jiguet
MNHN, 2011
(224 pages, 24 euros).

Hiirondelle de fenêtre, mésange bleue, alouette des champs... : chacune des 100 espèces d'oiseaux présentées dans cet ouvrage est un indicateur de l'impact sur la faune des aménagements territoriaux et du changement climatique. Fruit des observations de milliers de bénévoles, l'évolution de leurs effectifs sur 20 ans accompagne chaque descriptif.

doit s'apprécier non seulement au présent, mais aussi vis-à-vis des générations à venir. On ne peut impunément repousser sur celles-ci la recherche de solutions aux incohérences actuelles et la foi dans un « système technique » salvateur est une illusion permettant le plus souvent d'éluder les vrais enjeux.

Mais la « croissance » (prédatrice de ressources limitées) n'est pas antinomique du « développement » – à condition de faire la part, dans les « possibles » liés aux progrès de la technique, de ce qui relève du superflu. Sa démonstration est abondamment illustrée d'exemples percutants.

Il fait ainsi apparaître que nous vivons aujourd'hui une confrontation sans précédent entre un système naturel et fini, la biosphère, et un système sociétal prédateur : l'humanité armée de sa technique. Celle-ci ne pourra pas très longtemps survivre sans accepter des changements majeurs de comportement. Face à la complexité d'un état mondial en sur-sis, que peut-on proposer ?

L'auteur nous invite à aborder conjointement les aspects techniques, sociétaux et de finitude sous l'angle des besoins énergétiques, d'une gouvernance mondiale de l'environnement et du climat, d'une maîtrise de la démographie et plus essentiellement du rôle des politiques et de la place des citoyens dans un système démocratique. Ce livre est par là un réquisitoire en faveur de valeurs démocratiques capables d'imposer des contraintes aux pouvoirs. Et un appel pressant à une transformation profonde des sociétés dans leur structure, leurs comportements et leur relation avec notre planète mère.

→ Bernard SCHMITT
CERNh - Lorient

→ ÉCOLOGIE

La faune des forêts et l'homme

Roger Fichant
Quæ, 2011
(183 pages, 22 euros).

La gestion de la grande faune forestière est un sujet complexe. Dans ma pratique de gestionnaire d'une forêt domaniale française, il m'arrive d'entendre un décideur politique affirmer lors d'un débat sur les aménagements compensatoires à la création d'infrastructures routières que les hommes passent avant les animaux. Or le maintien de la faune et de ses habitats est favorable à la survie de l'homme. À long terme !

Dans ce livre, l'auteur, ingénieur des eaux et forêts de Belgique, explique très bien pourquoi un conflit entre la faune des forêts et l'homme existe. C'est l'homme qui, en faisant passer ses intérêts économiques avant ceux de la nature, a créé des habitats artificiels où les animaux ne s'autorégulent plus.

L'utilisation agricole ou touristique des espaces de plaine ou de montagne a refoulé les cervidés en forêt, lesquels broutent les jeunes arbres et sortent la nuit se nourrir en lisière. L'agriculteur voudrait ne plus tolérer la présence de cerfs ou de biches dans ses cultures, alors que la présence de ces garde-manger contribue à l'augmentation des populations de cervidés ! Le chasseur est accusé de ne pas prélever assez de gibier. Le forestier, lui, accepte le cerf, car il souhaite une forêt vivante, mais ne cesse de se battre pour que le niveau des po-



pulations ne compromette pas la régénération de la forêt, notamment en chênes. Quant au touriste, il veut autant voir des animaux en forêt que skier sur des pistes, ce qui modifie radicalement les habitats naturels.

Accompagné de monographies consacrées à 21 espèces, cet ouvrage pose de belle façon l'ensemble des éléments écologiques, économiques, sociaux jouant un rôle dans la gestion de la faune des forêts, et les situe dans leur contexte historique siècle après siècle. Il pointe tous les actes de gestion défavorables à un équilibre et donne ainsi des pistes d'amélioration aux différents types de gestionnaires de territoires.

Les écosystèmes forestiers et agricoles ont été modifiés par l'homme. Arrêter le développement humain semble illusoire, mais par des livres tels que celui-ci, on peut au moins sensibiliser l'homme aux besoins des espèces sauvages. Une nouvelle éthique en émergera, qui sera favorable à la vie de l'homme, puisqu'elle le sera aussi à la vie animale...

→ Régine Touffait
ONF-Villers-Cotterêts

.fr Retrouvez l'intégralité de votre magazine
et plus d'informations sur :
www.pourlascience.fr